

SÉRIE A, N° 1242

N° D'ORDRE :

2111

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. PONTE

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES SUR LA DIFFRACTION DES ÉLECTRONS.
ANALYSE ÉLECTRONIQUE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 10 Avril 1930 devant la Commission d'examen.

MM. ABRAHAM... *Président.*

FABRY..... }
LESPIEAU... } *Examineurs.*

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—
1930



Digitized by the Internet Archive
in 2026

SÉRIE A, N° 1242

N° D'ORDRE :

2111

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. PONTE

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES SUR LA DIFFRACTION DES ÉLECTRONS.
ANALYSE ÉLECTRONIQUE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **Avril 1930** devant la Commission d'examen.

MM. ABRAHAM... *Président.*

FABRY..... }
LESPIEAU... } *Examineurs.*

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—
1930

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen..... G. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe

Doyens honoraires.. P. APPELL, M. MOLLIARD.

Profess. honoraires. { A. JOANNIS. A. FERNBACH.
H. LE CHATELIER. A. LEDUC.
H. LEBESGUE. E. HEROUARD.

ÉMILE PICARD.....	Analyse supér. et algèbre supérieure.
G. KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale
E. GOURSAT.....	Calcul différentiel et calcul intégral.
P. JANET.....	Electrotechnique générale.
F. WALLERANT...	Minéralogie.
P. PAINLEVÉ.....	Mécanique anal. et mécanique céleste.
GABRIEL BERTRAND	Chimie biologique.
M ^{me} P. CURIE.....	Physique générale et radioactivité.
M. CAULLERY.....	Zoologie (Evolution des êtres organisés)
G. URBAIN.....	Chimie générale.
ÉMILE BOREL.....	Calcul des probabilités et phys. mathém.
L. MARCHIS.....	Aviation.
JEAN PERRIN.....	Chimie physique.
RÉMY PERRIER.....	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
H. ABRAHAM.....	Physique.
M. MOLLIARD.....	Physiologie végétale.
E. CARTAN.....	Géométrie supérieure.
L. LAPICQUE.....	Physiologie générale.
E. VESSIOT.....	Théorie des fonct. et th. des transf.
A. COTTON.....	Physique générale.
J. DRACH.....	Application de l'analyse à la géométrie.
CHARLES FABRY...	Physique.
CHARLES PÉREZ...	Zoologie.
LÉON BERTRAND...	Géolog. structurale et géolog. appliquée.
R. LESPIEAU.....	Théories chimiques.
E. RABAUD.....	Biologie expérimentale.
P. PORTIER.....	Physiologie comparée.
E. BLAISE.....	Chimie organique.
P.-A. DANGEARD..	Botanique.
P. MONTEL.....	Mécanique rationnelle.
P. WINTREBERT..	Anatomie et histologie comparées.
O. DUBOSQ.....	Biologie maritime.
G. JULIA.....	Mathématiques générales.
A. MAILHE.....	Etude des combustibles.
L. LUTAUD.....	Géogr. physique et géol. dynamique.
EUGÈNE BLOCH.....	Physique théorique et phys. céleste.
HENRI VILLAT.....	Mécanique des fluides et applications.
CH. JACOB.....	Géologie.
P. PASCAL.....	Chimie minérale.
LÉON BRILLOUIN..	Théories physiques.
V. AUGER.....	Chimie appliquée.
E. ESCLANGON....	Astronomie.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

E. PÉCHARD....	Chimie (Ens. P. C. N.).	L. JOLEAUD.....	Paléontologie.
M. GUICHARD....	Chimie minérale.	M. JAVILLIER....	Chimie biologique.
A. GUILLET.....	Physique.	A. DUFOUR.....	Physique (P. C. N.).
A. MAUGUIN....	Minéralogie.	F. PICARD.....	Zoologie (Evolution des êtres organisés).
L. BLARINGHEM	Botanique.	ROBERT-LÉVY...	Zoologie.
A. MICHEL-LÉVY	Pétrographie.	L. DUNOYER.....	Optique appliquée.
G. DEREIMS....	Géologie.	A. GUILLIERMOND	Botanique (P. C. N.).
A. DENJOY.....	Calcul diff. et int.	A. DEBIERNE....	Radioactivité.
H. BENARD.....	Physique (P. C. N.).	M. FRECHET.....	Calcul des probabilités et phys. mathém.
E. DARMOIS....	Physique.		
G. BRUHAT.....	Physique.		
H. MOUTON.....	Chimie physique.		

Secrétaire..... A. PACAUD

A SIR WILLIAM BRAGG

K. B. E., F. R. S.

A MA MÈRE,

A MA FEMME.

RECHERCHES SUR LA DIFFRACTION DES ÉLECTRONS ANALYSE ÉLECTRONIQUE

Par M. PONTE

La diffraction des électrons.

Analyse électronique.

INTRODUCTION

1. Selon les idées de Louis de Broglie (1), tout point matériel est « accompagné » d'une onde qui occupe tout l'espace et dont il est une singularité. Dans le système propre du mobile, de masse m_0 dans ce système, la phase est partout la même ; si maintenant on observe dans un système dans lequel la particule possède une vitesse v et une masse m , les ondes ne paraissent plus en phase. Il suffit de faire une transformation de Lorentz pour s'apercevoir de ce qu'il y a une vitesse de propagation de la phase égale à $\frac{c^2}{v}$ alors que la vitesse de propagation de l'amplitude est v , vitesse du mobile. On montre de plus que la fréquence ν de l'onde associée subit la même transformation que la masse :

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

et cette relation permet d'établir que la vitesse v est égale à

la vitesse de groupe de l'onde, suivant laquelle se déplace l'énergie (2).

Calculons la longueur d'onde qui correspond à cette fréquence ν .

Ce sera :

$$\lambda = \frac{\text{vitesse de phase}}{\nu} = \frac{c^2}{\nu v} \quad (2)$$

et, en écrivant que l'énergie totale du point matériel dans le système d'observation, mc^2 , est égale à l'énergie de l'onde dans ce même système, c'est-à-dire $h\nu$, on a :

$$h\nu = mc^2 \quad (3)$$

relation invariante par suite de la propriété (1). Il résulte immédiatement de (2) et (3) que l'on a :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (4)$$

ce qui peut s'écrire :

$$|\vec{p}| = \frac{h}{\lambda} \quad (5)$$

$\vec{p}$ désignant la quantité de mouvement du point matériel ou de son onde associée. Cette relation, immédiate pour un quantum de lumière, de vitesse c , s'étend donc à une onde quelconque.

On sait que cette idée de « l'onde associée » a conduit au développement de la mécanique ondulatoire dans laquelle c'est l'optique « physique » de l'onde associée qui règle la mécanique du point. Les succès de cette théorie ont montré que l'hypothèse de l'existence d'une onde associée est féconde et qu'elle doit être conservée. Il est cependant du plus haut intérêt pour la théorie de pouvoir mettre en évidence l'onde associée par des expériences directes, analogues à celles qu'on est habitué de faire avec des ondes quelconques. Il est très remarquable qu'on puisse effectivement mettre en évi-

dence l'existence d'ondes associées à un corpuscule en mouvement et mesurer leur longueur d'onde. Ce mémoire est relatif à des expériences de cette nature ; leur intérêt théorique se double d'un intérêt pratique qui nous permet de prévoir une nouvelle méthode d'analyse dont les ressources s'ajouteront à celles des méthodes que nous connaissons déjà.

2. Nous pouvons disposer pour faire ces expériences d'atomes ou de molécules, animés d'une vitesse d'agitation thermique connue, ou bien d'ions ou d'électrons dont la vitesse aura été créée par un champ électrique. Dans ce cas, si V est la différence de potentiel qui a accéléré un ion ou un électron, dont la charge est e et la masse au repos m_0 nous aurons :

$$eV = (m - m_0)c^2. \quad (6)$$

avec :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (7)$$

La valeur de v se calcule aisément et on trouve :

$$v = c \cdot \frac{\sqrt{e^2 V^2 + 2m_0 c^2 eV}}{m_0 c^2 + eV}. \quad (8)$$

D'où la valeur de la longueur d'onde associée :

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{m_0 v} \\ &= \frac{h}{\sqrt{2m_0 eV \left(1 + \frac{eV}{2m_0 c^2}\right)}} \end{aligned} \quad (9)$$

le terme $\frac{eV}{2m_0 c^2}$ caractérisant la « correction de relativité ». Si pour un électron on remplace les grandeurs h , m_0 , e et c par

leurs valeurs (tables internationales de constantes), on trouve que :

$$\lambda = \frac{12\,244}{\sqrt{V}(1 + 4,91 \cdot 10^{-7}V)} \quad (10)$$

si λ est en unités X et V en volts.

Ce résultat, joint aux résultats de la théorie cinétique, nous permet de nous rendre compte de l'ordre de grandeur à attendre pour les longueurs d'onde associées. Le tableau suivant en donne quelques exemples. λ est exprimée en unités X, c'est-à-dire en millièmes d'Angström, ou 10^{-11} centimètres.

		λ
Atomes d'hydrogène à 0°C		1,310
Atomes de Lithium à 600°C (jet atomique réalisable)		917
Electrons de	10 volts	3,872
	100 »	1,224
	1,000 »	387
	10,000 »	121,8
	100,000 »	36,9
Ions-H ⁺ de	10 »	90,1
	100 »	28,4
Rayons K α du cuivre		1,537
Rayons γ		$\lambda < 100$ environ

Les longueurs d'onde associées sont donc de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde des rayons X et des rayons γ .

Les expériences qui seront le plus aisément réalisables seront celles qui porteront sur des électrons : ce sont les jets d'électrons qui sont les plus faciles à obtenir et à déceler puisqu'ils impressionnent les plaques photographiques huilées dès qu'ils atteignent 25 volts et c'est avec les électrons qu'on pourra couvrir un domaine de longueurs d'ondes étendu. C'est donc avec eux qu'il faut chercher tout d'abord à mettre en évidence l'onde associée.

Nous rappellerons cependant que des tentatives ont été faites avec des atomes d'hydrogène ou des ions de diverse nature ; les résultats sont incertains et n'ont pas tous été confirmés par les auteurs eux-mêmes ; il semble établi qu'on peut observer la réflexion d'un faisceau d'atomes d'hydrogène sur du sel gemme (3) ; il en est de même pour des atomes de cadmium et de mercure (4). Ces expériences n'ont pas conduit à une mesure de la longueur d'onde associée ; elles indiquent cependant que les jets atomiques, dans leurs rapports avec le solide qu'ils rencontrent, ne suivent pas uniquement les lois de la mécanique ordinaire des chocs : à l'échelle de l'atome d'hydrogène incident, en effet, une face cristalline telle qu'une face de sel gemme, apparaît non pas comme un « miroir » mais comme une surface très accidentée en un point de laquelle le terme d' « incidence » n'a pas de sens. La mécanique ordinaire ne permet pas plus de comprendre que l'atome subisse une réflexion régulière sur la face d'un cristal qu'elle n'expliquerait comment une bille d'enfant pourrait être réfléchie régulièrement par un empilement de ces billes. Il faut admettre que l'atome est « dirigé » par son onde associée, et faire intervenir les lois de l'optique.

CHAPITRE PREMIER

Expériences antérieures.

Expériences de Davisson et Germer. — C'est à Davisson et Germer (5) que revient le mérite d'avoir mis en évidence pour la première fois l'onde associée à un électron. Nous répartirons leurs expériences en deux groupes : celles qui font intervenir un réseau superficiel et qui conduisent à la longueur d'onde de De Broglie. Celles qui font intervenir un réseau cristallin à trois dimensions et qui conduisent à trouver un indice pour les électrons, ainsi que des phénomènes analogues à ceux de la dispersion anormale.

Les expériences ont été faites avec des électrons lents, ne dépassant pas 500 volts ; les électrons étaient issus d'une cathode chaude et les faisceaux mesurés électrométriquement. Cette méthode est évidemment la meilleure puisqu'elle permet de mesurer également l'intensité des faisceaux diffractés. Cependant, elle exige un montage compliqué et, déjà pour des électrons lents, la dispersion qu'elle fournit est faible, ce qui ne permet pas de conclusions certaines sur l'acuité des réflexions.

Les réseaux diffractants étaient fournis par un cristal de nickel.

1^o RÉSEAU SUPERFICIEL — Ces expériences sont analogues à celles qu'on peut réaliser en optique avec des réseaux ordinaires ; elles ont été effectuées avec la face 111 du cristal.

Dans ce plan (cristal cubique, faces centrées), les atomes de nickel sont rangés aux sommets de triangles équilatéraux, comme l'indique la figure 1. Envisageons par exemple le réseau superficiel formé par les lignes à forte densité ab , $a'b'$ perpendiculaires à une hauteur, et situées à la distance $d = 2,15 \text{ \AA}$; soit un faisceau d'électrons de vitesse homogène, tombant normalement sur cette face et venons observer en plaçant la chambre de Faraday dans la direction A, avec son ouverture dans le plan de la face. Si nous augmentons progressivement la vitesse des électrons depuis des valeurs très petites, la longueur d'onde associée λ va diminuer et, si les prévisions de l'optique peuvent s'appliquer à ces ondes, on devra observer avec la chambre ainsi placée en faisceau diffracté lorsque $\lambda = d$. C'est effectivement ce qu'ont

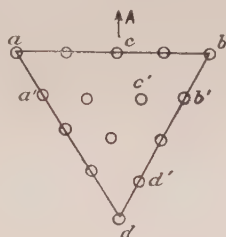


Fig. 1.

trouvé Davisson et Germer : ce faisceau « rasant » naît pour une vitesse électronique de 32,5 volts et il faut en conclure que, pour $V = 32,5$ volts, $\lambda = 2,15 \text{ \AA}$. La loi de de Broglie (formule 19) donne une longueur d'onde de 2,14 Å; les expériences ayant une précision de 1 0/0 environ sur la mesure de λ , la loi est donc parfaitement vérifiée.

Les mêmes phénomènes se produiront dans la direction B qui fait intervenir les rangées d'atomes parallèles aux hauteurs cd , $c'd'$. La distance de ces files d'atomes est ici de 1,24 Å et le faisceau rasant apparaît pour $V = 97,5$ volts. La loi de de Broglie est encore vérifiée.

Enfin, l'apparition des faisceaux possède bien une symétrie d'ordre 3 : si l'on fait tourner la face dans son plan, autour de l'axe ternaire (111) les faisceaux se reproduisent chaque fois que le cristal a tourné de 120° , comme l'exige l'interprétation des résultats par diffraction superficielle.

Les auteurs ne semblent pas avoir obtenu de faisceaux

pour les réseaux qui font intervenir des lignes de moindre densité, plus rapprochées mais Kikuchi a pu donner des diagrammes complets.

2° RÉSEAU CRISTALLIN A TROIS DIMENSIONS. — Les expériences sont analogues à celles de Bragg sur la réflexion des rayons X par une face cristalline. Si un rayon X de longueur d'onde,

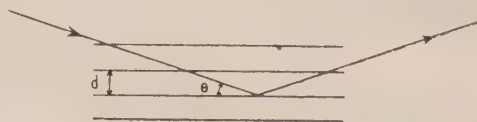


Fig 2.

tombe sur une face pour laquelle la périodicité du réseau est d , il y aura réflexion si θ est tel que ;

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (11)$$

en supposant l'indice du cristal égal à 1. Si celui-ci est égal à μ , il est facile de voir que l'on aura pour la réflexion :

$$n^2\lambda^2 = 4d^2 \sin^2 \theta \left[1 - \frac{1 - \mu^2}{\sin^2 \theta} \right]$$

c'est-à-dire, en faisant intervenir « λ Bragg », longueur d'onde qu'on aurait à partir des données expérimentales, sans tenir compte de l'indice :

$$\lambda = \lambda_{\text{Bragg}} \sqrt{1 - \frac{1 - \mu^2}{\sin^2 \theta}} \quad (12)$$

Dans le cas présent ; un faisceau d'électrons tombe sur la face 111 sous un angle donné, 80° par exemple ; on constate qu'on n'obtient de forts faisceaux diffractés que dans la direction de réflexion régulière et pour certains potentiels bien déterminés : c'est le phénomène qu'on observe en faisant tomber un fond continu X sur une face cristalline : seules

sont réfléchies les longueurs d'onde qui correspondent aux divers ordres de réflexion (11) : on retrouve le caractère ondulatoire de l'électron, mais, cette fois, pour les faibles potentiels utilisés, la loi de de Broglie n'est plus tout à fait vérifiée. En même temps, les ordres successifs ne correspondent plus à des longueurs d'onde qui soient multiples les unes des autres ; si on calcule le λ Bragg qui appartient à la position du cristal envisagée, on trouve que sa valeur

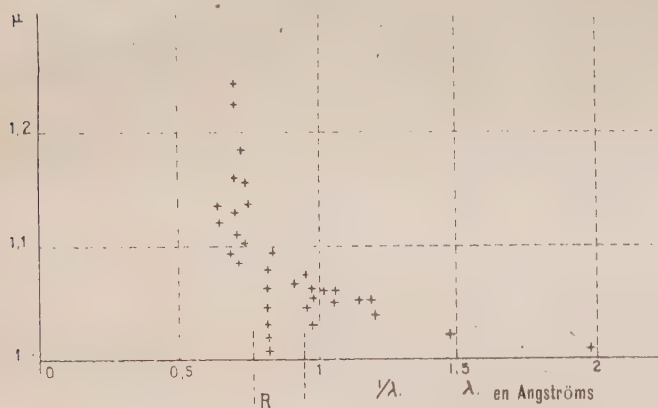


Fig. 3.

est supérieure à la longueur d'onde associée, calculée suivant la loi de de Broglie, l'écart entre les deux diminuant à mesure que l'ordre de la réflexion s'élève. Ces observations s'expliquent parfaitement si nous admettons dans la formule (11) un indice *supérieur* à 1. Cet indice peut être mesuré pour diverses vitesses d'électrons, il décroît à mesure que la vitesse des électrons croît : égal à 1,2 pour des électrons d'une soixantaine de volts, il est égal à 1 à 1/100^e près lorsque la vitesse des électrons atteint 500 volts. La figure 3 donne, suivant Davisson et Germer, les points expérimentaux qui représentent μ en fonction de λ . On remarque que, dans la région R se trouvent des variations rapides de μ indiquant une discontinuité, phénomène qui rappelle évi-

demment les variations de l'indice d'un milieu dispersif au voisinage d'une bande d'absorption. La position de cette bande ne correspond d'ailleurs à aucune des arêtes connues d'absorption du nickel. Si le phénomène peut être répété pour d'autres cristaux, il devra prendre une importance théorique considérable car on n'en voit pas actuellement l'explication avec les schémas des atomes tels que les donnent les rayons X. Rupp (9) a répété récemment des expériences analogues avec le nickel, le cuivre, l'argent, l'or, l'aluminium et le plomb. Il trouve également des indices supérieurs à 1 et décroissant avec la vitesse des électrons.

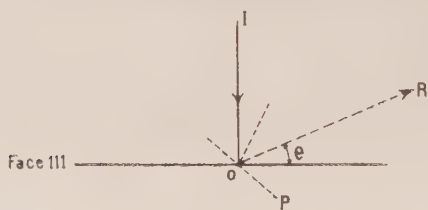


Fig. 4.

3° COMBINAISON DES DEUX SÉRIES D'EXPÉRIENCES. — Si, dans les expériences décrites au paragraphe qui traite des réseaux superficiels, l'observation se fait non plus dans le plan de la face, mais sous un angle θ qui augmente progressivement d'une expérience à l'autre, la longueur d'onde du faisceau diffracté suit d'abord la loi que donnerait un réseau superficiel d'espacement d : on a $\lambda = d \cos \theta$; mais il apparaît rapidement des phénomènes de sélectivité parce que le réseau à trois dimensions joue son rôle : on aura un faisceau intense lorsque la bissectrice de l'angle IOR sera normale à une direction de plan réticulaire P. Pour des angles θ considérables (40° par exemple) il ne restera même plus que les électrons diffractés sélectivement; c'est ainsi que dans l'azimuth A les électrons de 54 volts sont fortement diffractés, sous un angle θ de 40° parce que P se trouve être alors le

plan 331 alors que les électrons de 44 ou 68 volts ne donnent lieu qu'à des faisceaux diffractés très faibles.

Les expériences de Davisson et Germer sur un cristal de nickel établissent donc l'existence d'une onde associée pour des électrons lents (10-500 volts) satisfaisant à la loi de de Broglie (1 à 2 0/0) l'existence d'un indice pour ces électrons et de phénomènes de dispersion anormale qui ont d'ailleurs besoin d'être soigneusement vérifiés.

Expériences de Kikuchi (2). — Ces expériences ont été réalisées avec des feuilles de mica très minces, traversées par des rayons cathodiques, produits par une décharge et rendus monochromatiques par séparation magnétique; ces électrons avaient des vitesses comprises entre 14 et 78 kilovolts. Les observations se font par impression d'une plaque photographique; Kikuchi a obtenu de très beaux diagrammes complets de réseau superficiel, avec des feuilles de mica très minces, de moins de 10^{-5} cm. Dans le plan de clivage, les éléments diffractants sont disposés à la distance 5,17 Å suivant des triangles à peu près équilatéraux et il est aisé de voir que le diagramme superficiel dû à un faisceau d'ondes très courtes perpendiculaire à cette face d'onde se composera, sur une plaque qui lui est parallèle, de points situés suivant les sommets d'un réseau équilatéral. C'est bien ce qu'a trouvé Kikuchi et la distance des molécules, calculée à partir de la loi de de Broglie, reste comprise entre 5,10 et 5,23 Å. U.

Lorsque l'épaisseur de la feuille de mica augmente, les phénomènes superficiels diminuent d'intensité et on obtient des diagrammes de Laue, tout comme dans les expériences de Davisson et Germer; ces diagrammes peuvent s'analyser, comme il est classique de le faire pour les rayons X, afin de déterminer les plans réfléchissants.

Enfin, si l'épaisseur de la feuille augmente encore, on voit apparaître un phénomène nouveau: sur la plaque, en plus

des taches de Laue, on obtient des raies, s'associant en paires parallèles, chaque paire se composant d'une raie blanche et d'une raie noire. Kikuchi les attribue à la réflexion d'électrons diffusés dans toutes les directions à l'intérieur du cristal, sur les plans réticulaires de celui-ci.

Les expériences de Kikuchi sur des feuilles de mica donnent donc : pour des électrons rapides (10 000 à 85 000 volts) des phénomènes dus aux ondes associées, avec un indice égal à 1 dans ce domaine (Précision : 2 0/0 environ).

Expériences de Thomson-Rupp. — G. P. Thomson (7) a eu l'idée d'observer par voie photographique les phénomènes qui se produisent lorsqu'un faisceau d'électrons traverse une feuille extrêmement mince, de 10^{-5} à 10^{-6} cm., il a pris en général une feuille métallique, obtenue par dissolution de feuilles minces ou par pulvérisation cathodique sur une membrane de celluloïd très mince.

Les électrons étaient produits par une décharge et directement envoyés sur la feuille, G. P. Thomson a ainsi observé des anneaux de diffraction, produits par les micro-cristaux qui constituent la feuille, et dus aux électrons qui ont traversé la feuille sans changement de vitesse ou qui se sont diffractés sur les bords des trous dont la feuille doit être constellée. Ces expériences, avec les suivantes, ont donné pour la première fois une photographie de diffraction d'électrons dont la mesure permet de vérifier une loi de Broglie ; les électrons avaient, par exemple pour l'or, des vitesses de 20 000 à 70 000 volts environ.

Cependant, le potentiel accélérateur n'était pas continu, ce qui a pour effet d'élargir beaucoup les anneaux, avec une dispersion déjà faible ; d'autre part les potentiels étaient mesurés avec un éclateur et il semble que la précision de 1 0/0, réclamée par l'auteur, ait été difficilement atteinte.

Rupp (6) a réalisé les mêmes expériences, mais avec des électrons lents (10-500 volts), bien homogènes, traversant

des feuilles métalliques de 10^{-6} cm. obtenues par évaporation de métaux dans le vide sur des faces de sel gemme polies. Les observations se faisaient photographiquement ou électrométriquement. Il a trouvé que, pour tous les métaux étudiés (Al, Ag, Cu, Au, Ni, Cr, Zn) la loi de de Broglie se vérifie, avec un indice supérieur à 1 qui dépend du métal et décroît lorsque la vitesse des électrons augmente ; il devient égal à 1 à 100 lorsque les électrons atteignent 3 à 500 volts. Le mode de calcul de l'indice a fait l'objet de discussions entre Rupp et G. P. Thomson, celui-ci raisonnant sur un faisceau qui tombe « normalement » sur la feuille

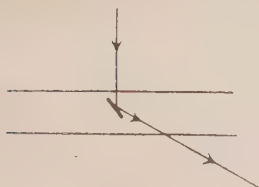


Fig. 5.



Fig. 6.

supposée formée de plans parallèles et subissant une réfraction à la sortie (fig. 5). Si on va plus au fond des choses, il est évident que la feuille est très irrégulière et qu'on ne peut parler ni d'incidence ni d'émergence sur la feuille, mais seulement sur des faces cristallines. Rupp utilise simplement pour le calcul de ses indices l'expression :

$$2d\mu \sin \theta = n\lambda \quad (13)$$

Ceci n'est pas correct non plus puisqu'il y a, à l'entrée et à la sortie du micro-cristal, une réfraction et que celle-ci dépend de la façon dont le plan réflecteur est placé par rapport aux faces du micro-cristal, placé dans une position telle que le plan envisagé soit sous le bon angle après réfraction

sur la face d'entrée ; on ne peut donc pas même en général appliquer la formule (12), sauf pour les faces du micro-cristal. La formule (11) donne cependant l'ordre de grandeur et les expériences sur les poudres peuvent révéler l'existence d'un indice ; mais si on veut celui-ci avec précision, il faut travailler sur un cristal unique dont on connaît la position par rapport au faisceau incident.

CHAPITRE II

Appareil utilisé.

Nous décrirons ici l'appareil utilisé dans nos expériences ; c'est un appareil entièrement métallique, construit par les soins de M. Gondet, ingénieur des établissements Beaudoin, que je tiens à remercier ici de son concours éclairé.

L'appareil comprend essentiellement :

Une cathode C qui émet les électrons et à laquelle sera appliquée la tension négative accélératrice.

Une pièce anodique A munie d'un canal pour les électrons.

Une chambre B dans laquelle se propageront les faisceaux.

Un dispositif porte-plaques ou écran P.

Un manomètre M.

Cathode. — La cathode est une cathode chaude montée sur un support entièrement métallique (fer), les isolements nécessaires étant réalisés grâce à du mica.

Une cupule de concentration peut se déplacer et modifier la concentration du faisceau émis (fig. 8). La cathode est portée par un manchon de verre par le rodage graissé métal-verre R₁, qu'on peut tourner sous le vide sans rentrée d'air.

Pièce anodique. — L'anode proprement dite est aménagée afin de former un canal pour les électrons : elle se compose d'un tube de fer de 10 mm. de diamètre et de 80 mm. de long, qui porte des diaphragmes percés dans des parois minces (1/2 mm.) pour éviter autant que possible la forma-

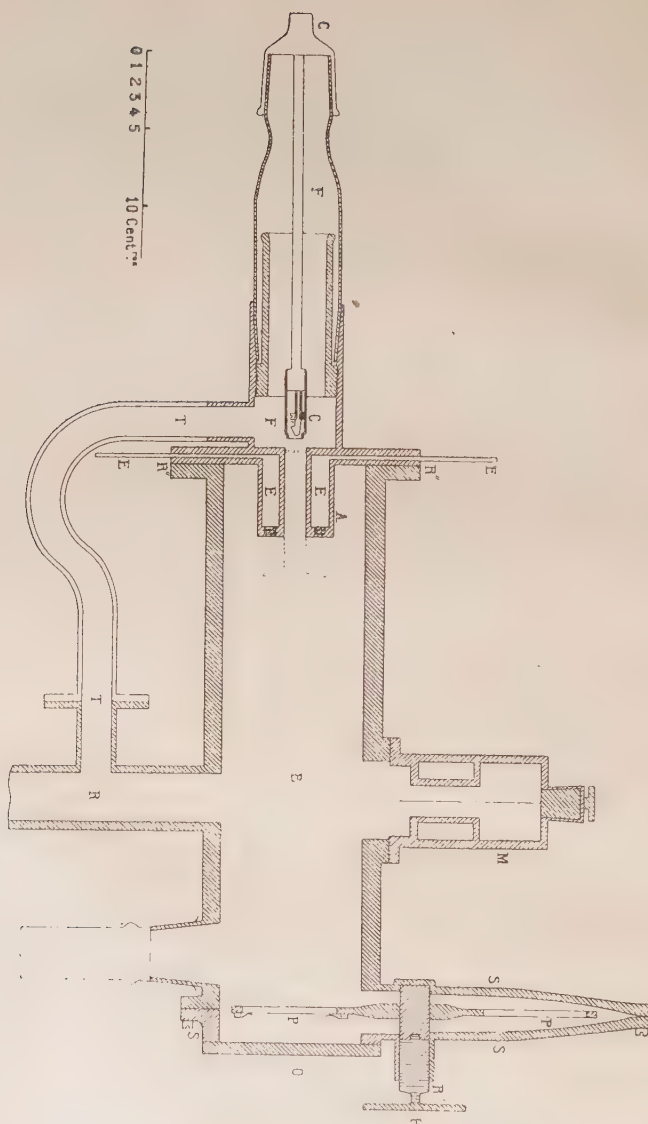


Fig. 7.

tion de rayons X gênants. Le premier diaphragme d , a un diamètre de $2/10^e$ mm. ; il est porté par un bouchon muni d'un filetage fin et long, ce qui permettra un bon refroidissement ; un deuxième diaphragme de $2/10^e$ mm. se trouve à 3 cm. du premier. Le tube porte à son extrémité un filetage intérieur dans lequel pourra se visser un bouchon analogue

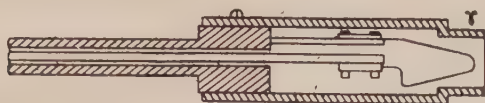


Fig. 8.

au bouchon d'entrée. Le tube se termine par une joue j munie de deux trous filetés t pour la mise en place des supports des matières diffractantes (Cf. p. 28).

A la place du bouchon, on peut visser d'autres segments de fer, construits de la même manière et portant un dia-

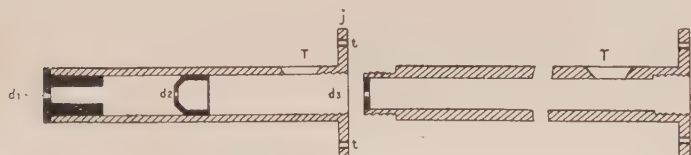


Fig. 9.

phragme supplémentaire de $1/2$ mm. placé à l'entrée. Les extrémités de sortie des segments sont identiques à celle qui vient d'être décrite.

Chaque segment porte un trou T de 10 mm. qui permet de faire le vide à l'intérieur, autrement que par les petits diaphragmes ; il n'y a que la chambre $d_1 d_2$ de très petit volume qui soit vidée à travers ces petits orifices.

Cette disposition permet de modifier la dispersion de l'appareil, c'est-à-dire de modifier la distance plaque-substance diffractante en plaçant celle-ci plus ou moins loin

à l'intérieur de la chambre B. On peut mettre bout à bout le segment anodique proprement dit et trois segments, deux de 10 cm. et un de 5 cm.

Le segment anodique entre à frottement dur dans un canal de même diamètre, aménagé dans un bloc de laiton D ; il occupe alors la position figurée sur la figure 7. Le bloc est refroidi par une circulation d'eau E. La chambre dans laquelle sera la cathode se trouve en F ; elle est directement vidée par un ajutage spécial T (35 mm.), en plomb pour faciliter l'assemblage de l'appareil.

Chambre de diffraction B. — C'est un cylindre de laiton de 370 mm. sur 90 intérieur. Il se raccorde à la pièce anodique par un rodage plan R". Ce rodage ne sert qu'à permettre l'assemblage de l'appareil ; une fois tout en place, il n'est jamais défait ; le diamètre de la chambre est suffisant pour qu'on puisse atteindre l'extrémité des segments en introduisant la main en O. Cette chambre est vidée par l'ajutage R (40 mm.) sur lequel vient se brancher T. Ce vide se fait par une pompe Holweck.

Dispositif porte-plaque et écran. — La chambre B se termine par un rodage plan O et une pièce fondue S, de 280 mm. de diamètre. Celle-ci est faite en deux parties raccordées tout le long de la périphérie par un rodage plan ; on obtient ainsi une grande cavité dans laquelle se déplaceront la plaque ou l'écran. Ceux-ci se trouvent aux extrémités d'un bras, entraîné par un rodage conique R"', et qui peut ainsi être déplacé de l'extérieur. L'un des cadres porte un écran, formé d'une plaque de verre légèrement graissée et saupoudrée de wilhemmite ; l'autre porte la plaque. On pourrait facilement ajouter d'autres plaques, qui permettraient plus d'une pose par expérience. Le rodage O est fermé par une glace.

Manomètre. — Le manomètre M est un manomètre absolu, dessiné par M. Planiol. La feuille se déplace entre les faces planes et parallèles de deux blocs de cuivre, parcourus par une circulation d'eau. Celle-ci, entre ses deux passages à tra-

vers les blocs, circule dans un tube qui contient une résistance chauffante. Les déviations de la feuille sont observées avec un viseur et on peut évaluer le $1/500^{\text{e}}$ barye environ.

Montage électrique. — Il faut un dispositif qui produise une tension constante et stable, et un instrument de mesure de cette tension. La vitesse des électrons utilisés n'a pas dépassé celle qui correspond à 20 000 volts et le débit maximum du tube est de 2 milliampères.

D'autre part, durant les expériences, on *repère* la tension aux bornes du tube par un électromètre Abraham-Villard E qui ne débite pas et qui est d'une lecture commode. Avant et

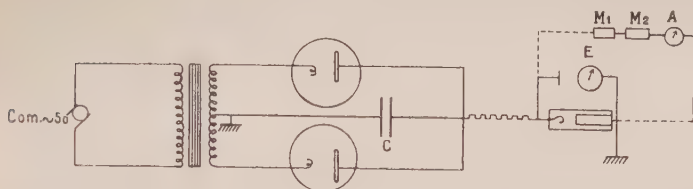


Fig. 10.

après l'expérience ou une série d'expériences, on étalonne le voltmètre à l'aide de deux boîtes de deux mégohms, exacts chacun à une centaine d'ohms près et un milliampèremètre A, étalonné au Laboratoire Central et permettant d'apprécier le $1/100^{\text{e}}$ mA. Le débit maximum du circuit d'étalonnage est donc de 5 mA. Le dispositif de tension constante destiné à produire 20 000 volts, 5 mA est représenté figure 10. C'est le dispositif classique, bien connu dans le montage de tubes à rayons X. La fréquence d'alimentation étant de 50, la capacité C est de 0,5 microfarad. La fluctuation de la tension est donc de l'ordre de $1/200^{\text{e}}$.

Le transformateur T est alimenté par le secteur et, lorsqu'on a besoin d'une tension mieux définie, par une commutatrice entraînée par une batterie d'accumulateurs. La tension primaire est alors définie à $1/150^{\text{e}}$ près environ.

CHAPITRE III

Faisceau cathodique et phénomènes accessoires.

Faisceau cathodique. — *Cathode.* — On peut penser à utiliser comme source chaude un filament de tungstène ou une cathode de Wehnelt ; celle-ci a l'avantage d'être d'un montage commode et de chauffer très peu son support métallique ; d'où un vide meilleur, obtenu plus rapidement ; plusieurs séries d'expériences ont été faites avec des cathodes formées d'une bande de platine laminé à $1/20^{\circ}$ mm. et de 1 mm. de large environ. La lame est recouverte d'un mélange de carbonates de baryum et de strontium ; au premier chauffage dans le vide, on obtient une cathode recouverte d'oxydes. Ces cathodes ont dû être rejetées parce qu'on n'a pu arriver à leur faire donner une émission bien stable ; l'émission croît en général au début du fonctionnement puis décroît lentement ; elle peut tomber de 2 mA. à 1 mA. en une heure. Ce phénomène doit être relié aux propriétés connues de certaines cathodes à oxydes : une cathode peut être « formée » par application d'un champ électrique assez grand (par exemple 500 volts-cm.). c'est-à-dire qu'on pourra accroître ainsi son émission, mais si on pousse trop longtemps l'application du champ, l'émission se met à décroître. Dans notre appareil, la cathode étant à quelques millimètres de l'anode, est soumise à un champ qui peut atteindre 30 000 à 50 000 volts-cm. ; les cathodes à oxydes faites de cette façon ne peuvent supporter des champs aussi considérables. Cette usure rapide de la cathode s'accompagne d'une décomposition chimique des oxydes : à l'ouverture du tube, la cathode apparaît noire et

elle blanchit ensuite à l'air, très rapidement, si on chauffe légèrement la cathode : on était en présence des alcalino-terreux eux-mêmes. Cette décomposition peut être due à une extraction des ions O^{--} sous l'action du champ intense, à une électrolyse la couche d'oxyde par le courant thermionique ou au bombardement de la cathode par les ions positifs dus aux gaz restants, sans qu'on puisse nettement se prononcer.

D'autres essais, sur des fils de platine et de tungstène recouverts d'oxydes ou d'azotates, n'ayant pas été plus heureux, les cathodes à oxydes ont été abandonnées pour adopter des cathodes à filament de tungstène. Après divers essais, on a trouvé que la meilleure forme était celle d'un filament en V dont la pointe, assez aplatie, est placée en face du canal anodique. La lumière émise par ce filament n'est pas gênante dans l'appareil qui a été décrit ; elle a même été utilisée pour des expériences de vérification (Cf. p. 36).

Formation du faisceau. — Dans ce qui suit il ne s'agira que d'électrons de vitesse inférieure à 20 000 volts, les études n'ayant jamais porté sur des électrons plus rapides.

En principe, la formation du faisceau est très simple : la cathode étant allumée, on tourne le rodage R' jusqu'à ce que le faisceau émis par la cathode et sa cupule passe par le canal anodique. La position de ce rodage doit être fixée à quelques degrés près ; le faisceau émis par la cathode doit être très fin, même avec un filament de tungstène en spirale, analogue à ceux qu'on utilise pour les tubes à rayons X ; une rotation du rodage de 2° à 3° fait disparaître le spot sur l'écran ; cette position est moins bien définie avec les cathodes à oxydes.

Lorsqu'on a formé un spot, obtenu avec un filament de tungstène on peut réduire le courant thermionique de 10 à 1 (passant par exemple de 1 à 1/10 mA.) sans que l'intensité du spot soit considérablement changée. Il semble que l'émis-

sion du tungstène dans ces champs élevés se passe par « jets » et qu'il faille amener l'un de ces jets à passer par le canal anodique. Ceci est confirmé d'une part par une étude de l'émission d'un filament par la « méthode du trou » : on enlève tous les diaphragmes sauf un, celui qui est près du filament et on observe l'image obtenue sur l'écran lorsqu'une tension est appliquée. L'image d'un filament spiralé par exemple n'est pas une spirale, mais elle est formée de taches irrégulières bien séparées, alors que l'image due à la lumière a la forme d'une spirale. On peut signaler que Wood (10) a eu également de difficultés des concentration dans la construction d'un oscillographe cathodique et qu'il les attribue aussi au fait que les électrons doivent être émis sous la forme de pinceaux fins.

La position du rodage dépend en général du champ magnétique du courant de chauffage et l'effet est considérable avec le filament spiralé qui a été abandonné, pour cette raison et parce que le nombre de watts qu'il nécessite est trop élevé : la cupule de concentration, qui est en fer, dégage indéfiniment et le vide est mauvais, de l'ordre de $3/10^6$ barye. Avec le filament en V, le sens du courant de chauffage n'a que peu d'influence, le champ magnétique qu'il produit reste faible en effet puisque les champs dus aux deux branches du V s'annulent et le vide, sans tension, peut atteindre $1/20^6$ barye le vide étant de l'ordre de $3/100^6$ barye lorsque le filament est éteint.

Phénomènes qui gênent la formation du spot cathodique.

— Lorsqu'on a trouvé la position du rodage qui permet aux électrons de traverser la suite de diaphragmes très étroits qui délimiteront le faisceau, on peut rencontrer deux sortes de phénomènes qui gênent la formation sur l'écran d'un spot circulaire de faible diamètre, qu'il faut obtenir pour observer des phénomènes de diffraction.

Le premier de ces phénomènes est un phénomène de

« fatigue ». Le filament étant allumé, un spot se forme lorsque la tension négative est appliquée sur la cathode mais il disparaît ensuite plus ou moins vite ; il peut avoir presque complètement disparu au bout de quelques secondes. La pression, lors de ces observations, était de l'ordre de la pression normale lorsque le filament est chauffé et la tension appliquée c'est-à-dire $1/10^6$ barye environ pour 2 mA., 15 000 volts.

Le spot peut s'effacer en totalité ou seulement en partie ; dans ce dernier cas, on arrive à des spots en forme de croissants, toute une partie de la plage circulaire primitive ayant disparu.

Ces phénomènes se produisent intensément pour des électrons dont la vitesse dépasse 5 000 volts environ ; ils sont particulièrement intenses avec le tungstène, bien que nous les ayons observés également quelquefois avec des cathodes de Wehnelt. Pour des électrons de quelques milliers de volts, 1 à 3 000 par exemple, il ne se passe rien de semblable et il est très facile d'obtenir de beaux spots avec ces électrons lents. Mais dès qu'on élève progressivement la tension, on voit le spot se creuser pour ne plus former, vers 10 000 volts par exemple, qu'une mince bande lumineuse ; il est impossible de retrouver un spot en cherchant une autre position du rodage cathodique. Si on coupe la tension à ce moment-là et qu'on la remette, le spot, d'abord bien circulaire, se déforme pour aboutir au même état ; si on baisse la tension pour la ramener à des valeurs basses, le spot se reforme progressivement.

L'explication de ces phénomènes nous paraît devoir être recherchée dans l'action des ions positifs formés dans le gaz restant par ce faisceau électronique. Les ions formés le long du trajet du faisceau se précipitent sur la cathode ; il y a ainsi un faisceau d'ions positifs qui vient heurter la cathode.

Si l'on tient compte du fait que le gaz résiduel est en majeure partie formé de vapeurs organiques dues à la

graisse des rodages et que le tungstène est très sensible à l'action des ions organiques, on comprend bien la disparition du spot, disparition d'autant plus marquée que les ions positifs auront plus d'énergie.

En fait, on a pu se débarrasser presque complètement de ces phénomènes gênants en réduisant le plus possible le trajet des électrons dans la région accélératrice, où se forment les ions, c'est-à-dire en rapprochant autant que possible la cathode de l'entrée du canal anodique (5 mm. environ).

Le deuxième phénomène que nous avons observé est encore plus gênant : parfois, lorsqu'on élève la tension, le spot, au lieu de se déformer simplement comme je l'ai décrit se divise en une foule d'étoiles et de taches qui recouvrent presque tout l'écran. La photographie 1 montre ce que l'on peut obtenir avec des électrons de 10 000 volts environ : il n'y a plus aucune trace du spot central. Comme pour les déformations du spot, la figure ainsi obtenue ne s'établit que lentement (quelques secondes). Ces phénomènes sont en tous points semblables à ceux que j'ai observés lorsque les électrons tombent sur des fibres isolantes (p. 29) : ils doivent être attribués à la présence sur les bords des diaphragmes, de poussières isolantes qui se chargent et repoussent ainsi les électrons dans des directions désordonnées. Ces figures se produisaient en effet lorsque les diaphragmes, qui doivent naturellement être maintenus très propres, étaient nettoyés avec de petits morceaux de papier Joseph ; j'ai pu les éliminer en prenant soin d'envoyer sur chaque diaphragme ainsi nettoyé un fort courant d'air comprimé qui balaye toutes les poussières.

Phénomènes photographiques. — Les plaques qui ont été utilisées pendant tout ce travail sont des plaques ordinaires, Lumière étiquette mauve. Il n'y a aucun intérêt à utiliser des plaques pour rayons X qui ont une tendance au voile plus grande que les précédentes.

Les expériences sur la photographie directe d'un spot d'électrons dans un vide aussi poussé ont montré une difficulté nouvelle : si on cherche à photographier pendant de longues expositions (un quart d'heure par exemple) un spot circulaire intense, de 1 mm. de diamètre pour fixer les idées, la photographie ne révèle pas une tache noire circulaire, mais une série de houppes (fig. 11) qui partent des régions qui ont reçu les électrons pour aller s'étendre très loin, parfois jusqu'au bord du cadre métallique qui supporte la plaque, c'est-à-dire à 3 cm. du point d'impact du spot. La photographie 2 montre quelle peut être l'ampleur du phénomène. En observant la plaque à la loupe, on voit que les houppes ont une origine bien déterminée : elles commencent brusquement en un point, puis s'infléchissent pour se réunir en une traînée commune.



Fig. 11.

Ces phénomènes nous semblent être des conséquences de la charge de la plaque sous l'action des électrons, accompagnée de phénomènes analogues à ceux de la solarisation. Tout d'abord, c'est bien la plaque qui en est le siège et on ne photographie pas quelque phénomène de diffusion des électrons par des diaphragmes : j'ai établi ce fait de la façon suivante :

1° Je n'ai pas vu ces phénomènes sur l'écran fluorescent ;

2° En prenant diverses poses de même durée sur une même plaque et avec un spot bien circulaire (en changeant simplement la position du rodage porte-plaque), les diverses « houppes » obtenues ne forment pas les mêmes figures d'un spot à l'autre ;

3° En recouvrant la plaque d'une feuille d'aluminium battu et opérant avec des électrons de vitesse assez grande (10 000 volts), on peut photographier le spot : on obtient une figure très floue mais il n'y a plus de houppes ;

4° La plaque étant recouverte d'un treillis conducteur (toile de cuivre), s'il s'agit de phénomènes extérieurs à la

plaque, la toile portera ombre sur les houppes qui seront sillonnées par un quadrillage marqué en blanc. S'il s'agit de phénomènes de charge qui se passent sur la plaque, ils disparaîtront aux points où le treillage touche la plaque et, aux points où il n'y a pas contact, il y aura des houppes mais sans ombres. C'est effectivement ce qui se passe : sur une même plaque ont été photographiés deux spots, l'un directement, l'autre sur une portion de la plaque recouverte d'une toile de cuivre, le premier présente des houppes, l'autre n'en offre plus qu'une petite sur laquelle l'ombre du grillage n'est pas marquée ;

5^o Enfin, deux spots ont été pris sur deux régions d'une même plaque ; sur l'une d'elles avaient été tracés des traits à la craie ; sur l'autre, des traits de crayon, conducteurs. Sur la craie, les houppes subsistent ; sur le crayon elles ont disparu.

L'ensemble de ces observations est en accord avec l'hypothèse d'une charge de la plaque sous l'action des électrons ; les charges s'accumulent à l'endroit où se forme le spot et, à un moment donné, une décharge se produit dans la plaque, laissant une trace impressionnée plus conductrice. Lorsqu'une autre décharge se produira au voisinage de la première, elle empruntera ce chemin plus conducteur, d'où la tendance qu'ont les houppes voisines à se réunir. Il faut également faire intervenir des phénomènes de solarisation puisque, le plus souvent, il n'y a plus de tache centrale.

Ce phénomène peut être très gênant pour l'étude de la diffraction des électrons car il interdit l'emploi des spots intenses ; pour obtenir la figure de diffraction, on doit en général poser assez longtemps pour que les « houppes » puissent apparaître et la figure de diffraction peut être complètement masquée. D'autre part, la substance diffractante émet alors trop de rayons X et d'électrons diffusés (ou émis) dans toutes les directions : on a un voile dont l'intensité croît plus vite avec celle du faisceau que ne le fait l'intensité

des anneaux de diffraction. Il est donc nuisible d'avoir des spots trop intenses. Naturellement, il faut cependant avoir assez d'électrons incidents pour rester dans des limites de temps de pose acceptables; il faut un certain doigté pour arriver à la bonne intensité. Les poses utilisées dans ces conditions, pour obtenir les figures dont il sera question, sont en général de l'ordre de l'heure.

CHAPITRE IV

Montage de diffraction des électrons par des poudres cristallines.

Support de la poudre. Fils. — Les phénomènes de diffraction électronique étant causés par les toutes premières couches de cristaux, il faut naturellement éviter de contaminer

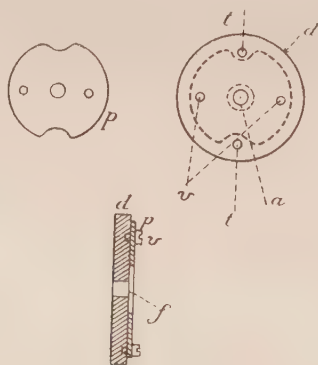


Fig. 12.

la surface par un agglomérant quelconque et simplement déposer la poudre sur un support.

Les premières expériences ont été faites avec un support formé d'un fil métallique (argent, or, platine). Un disque de laiton de 20 mm. environ de diamètre est percé d'un trou a de 1 mm. et les vis v permettent de serrer sur lui la plaque p , de 1/2 mm. d'épaisseur et dont le trou central a 3 mm. de diamètre; ces grandeurs sont choisies de telle

sorte qu'on puisse avoir un cône de diffraction suffisant. Le fil métallique, de $1/20^e$ à $1/10^e$ mm. de diamètre est glissé entre le disque et la plaquette, centré à l'aide d'une aiguille et les deux vis v sont serrées. L'ensemble est alors vissé sur la joue j du dernier segment du collimateur à électrons (p. 17) les trous t correspondant à ceux de la joue mais avec un léger jeu. Ce jeu permet de centrer exactement le fil dans l'axe du segment : celui-ci qui est défini par le diaphragme d et par le bouchon est dirigé sur une source lumineuse et on centre le fil dans le faisceau à l'aide d'une loupe. Les vis sont alors serrées et le segment vissé dans l'appareil. Le dispositif permet de changer le support, la matière diffractante..., la dispersion..., etc. de façon rapide, sans avoir rien à toucher aux éléments qui définissent le faisceau électronique.

Un fil métallique monté dans ces conditions porte sur la tache centrale une « ombre » qui a les dimensions qu'on peut calculer géométriquement à partir des dimensions de l'appareil.

Isolants. — Il n'en est plus du tout de même si le fil métallique est remplacé par un fil isolant. Les expériences ont porté sur des fibres de coton de verre et des fibres de soie végétale.

Une fibre de coton de verre de $1/10^e$ mm. environ est montée suivant le dispositif qui a été décrit, et une tension de 15 000 volts, par exemple, est appliquée sur la cathode : le spot se divise très vite, jusqu'à ce que l'ombre (qui serait de 1 à $2/10^e$ mm. seulement pour un fil métallique) atteigne des dimensions de l'ordre du centimètre ; en même temps, les électrons sont dispersés tout autour de cette ombre. Puis les bords s'écartent plus lentement : la surface de la fibre se charge en captant des électrons : elle les repousse et en prend de moins en moins, jusqu'à ce qu'elle prenne un potentiel de régime, défini par les dimensions et la résistivité de la fibre : on a un phénomène analogue à celui de la charge

d'un condensateur qui « fuit », la constante de temps étant ici très grande.

La photographie 3 montre les phénomènes qu'on obtient avec une fibre de verre et des électrons de 15 000 volts, la trace plus claire étant due au déplacement de la tache durant la pose ($1/4$ d'heure).

Plus les électrons sont lents, moins le spot se divise, mais si on abaisse brusquement la tension, les deux portions du spot sont d'abord beaucoup plus séparées qu'avec la tension élevée, car la fibre a conservé la charge due à cette dernière, mais progressivement, en quelques minutes, le spot se resserre et, pour 500 à 600 volts, l'ombre est « géométrique ».

Avec des fibres de soie végétale, les phénomènes sont encore plus accentués, la résistivité de ces fibres étant plus grande que celle du verre : pour 15 000 volts et une distance de fibre-plaque de 23 cm., l'ombre portée sur la plaque par une fibre de 10 μ au bout de quelques minutes dépasse les dimensions de la plaque ; les taches diffusées montrent également des points très brillants qu'on serait tenté d'attribuer à des phénomènes de diffraction, mais cette interprétation doit être réservée.

Ces expériences prouvent que :

Le support des poudres doit être métallique, et si la poudre est isolante, celle-ci doit être déposée en couche très mince ;

L'interprétation de la « dispersion » du spot observée parfois est défendable ;

L'analyse électronique des substances isolantes, qui est du plus haut intérêt — par exemple pour l'étude de l'absorption de l'eau par la surface des verres — doit être essayée avec des électrons lents ⁽¹⁾.

(1) Quelques essais de dépôt d'une couche d'argent très mince (pulvérisation cathodique) sur les fibres isolantes n'ont conduit à rien ; j'espérais avoir une couche d'argent assez mince pour que les électrons puissent encore atteindre la surface de l'isolant. Ces essais seront repris.

Diaphragmes en forme de fente. — Le montage avec fil a été celui que j'ai employé en premier et il a donné de bons résultats (p. 37). Il n'est cependant pas satisfaisant.

En effet, les électrons utiles sont ceux qui ont touché les bords *aa* du fil ; les autres, qui donnent sur la plaque un spot de quelques dixièmes de millimètre sont nuisibles, puisqu'ils voilent inutilement la plaque.

De plus, les anneaux obtenus ont leur maximum de netteté suivant celui de leurs diamètres qui est perpendiculaire au fil, et c'est précisément suivant cette direction *D* que la plaque est la plus voilée par diffusion : les petits anneaux risquent d'être masqués.

Ces raisons montrent qu'il vaut mieux prendre un montage inverse du précédent, c'est-à-dire faire tomber le faisceau d'électrons sur un diaphragme linéaire très étroit *dd*. Celui-ci a été réalisé en montant dans la monture décrite plus haut des feuilles d'argent ou d'aluminium de 2 à 5/100^e mm., dans lesquelles avait été donné un léger coup de rasoir ; la largeur du trait était de l'ordre de 1/20 mm. également. Le spot se présente alors sous la forme d'un trait très mince (0 mm. 13, par exemple, Cf. CdO) dont la largeur est bien mesurable ; le voile de la plaque est aussi réduit que possible (si on évite toujours les spots trop intenses). Seuls les réglages (centrage, réglage du spot) sont un peu plus délicats.

C'est sur les bords de ce diaphragme que sera déposée la poudre à analyser.



Fig. 13.

Dépôt des poudres. — Les poudres cristallines ont été déposées en maintenant pendant quelques instants le fil métallique ou le diaphragme, montés dans leur support, dans des vapeurs ou des fumées de la substance à étudier. Les expériences sont les plus faciles à réaliser avec les oxydes des métaux tels que le magnésium, le zinc, le cadmium, qui

brûlent facilement à l'air. Un fragment de métal est porté dans une flamme ; lorsque la combustion commence, on obtient des fumées d'oxyde dans lesquelles on passe rapidement la monture. Le fil ou le diaphragme se recouvrent de couches d'oxyde.

C'est ainsi qu'ont été obtenus les résultats du chapitre suivant.

CHAPITRE V

Résultats de la diffraction par les poudres.

Analyse électronique.

Vérification de la loi de de Broglie, à 1 0/0.

Dès les premières expériences réalisées avec le montage qui a été décrit précédemment (fils), des anneaux sont apparus sur les plaques. Pour pouvoir les interpréter, il faut connaître la distance du fil ou diaphragme à la plaque, D . Celle-ci est mesurée de la façon suivante :

Le rodage porte-plaques est tourné de façon que l'un des montants du porte-plaques arrive sur l'axe de l'appareil ; une réglette en métal poli, terminée par une pointe effilée, est enfoncée dans l'appareil jusqu'à ce que la pointe touche le porte-fil d (fig. 12), elle est appuyée très légèrement contre le montant et avec une pointe fine on trace un trait léger, correspondant au bord de ce montant. On recommence en tournant le rodage afin d'amener le deuxième montant sur l'axe. La réglette est alors portée sur une machine à diviser, et la moyenne des lectures donne la distance du centre de la plaque au diaphragme (ou fil). Voici des mesures faites dans ces conditions :

1 ^{re} position du rodage .	23,365	23,356	Moy. 23,36 cm.
2 ^e position du rodage .	23,381	23,376	Moy. 23,38 cm.

D'où $D = 23,37$ à $1/2000^e$ près. Les mesures sont toutes comparables à la précédente : D est connu avec une erreur absolue qui ne dépasse pas 1 à $2/5$ mm.

Le diamètre des anneaux intenses peut se mesurer avec une très grande précision avec une machine à diviser à fort

grossissement, mais il est rare qu'on puisse le faire. En général, les anneaux ont été mesurés avec une machine à diviser de grossissement un ou avec un décimètre. Avec un peu d'habitude, on arrive à apprécier avec ce dernier le $1/10^e$ mm. sur le diamètre des anneaux. Celui-ci est toujours pris au maximum de netteté, c'est-à-dire suivant la direction perpendiculaire au fil ou au diaphragme. En effet, chaque point de celui-ci donne un cercle sur la plaque, et l'ensemble des points diffractants donne un ensemble de cercles, enveloppés par des droites parallèles dd au fil, c'est sur ces droites que la netteté est la plus grande.

Corrections. — L'épaisseur du fil ou la largeur du diaphragme amènent des corrections, de signe opposé, dans

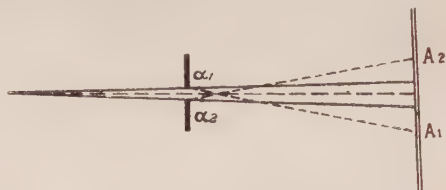


Fig. 14.

ces deux différents cas. Pour le diaphragme, par exemple, le bord α_1 ne diffractera que dans la région 1, opposée à ce bord et α_2 , dans la région 2. L'anneau A_1A_2 , dû à une certaine distance réticulaire, aura donc un diamètre diminué par le montage, d'une quantité égale à la largeur de la tache centrale sur la plaque (d'où l'intérêt d'avoir un diaphragme aussi étroit que possible). Il faudra donc ajouter au rayon mesuré la moitié de la largeur de la tache centrale.

Dans le cas du fil, c'est le contraire qui se produit. Les anneaux sont légèrement dilatés et il faudra retrancher la moitié de la tache centrale au rayon mesuré.

Ces corrections sont d'ailleurs toujours faibles (de l'ordre de $1/20^e$ à $1/15^e$ mm. ; cf. plus bas).

Résultats. Diaphragmes métalliques seuls. — Les fils métalliques (or, platine, argent), soigneusement nettoyés et chauffés avant introduction dans le tube, n'ont jamais donné de phénomènes de diffraction.

Par contre, un diaphragme linéaire, découpé dans une feuille d'argent mince suivant le procédé qui a été décrit, a donné, avec des électrons de 13 240 volts ($\lambda = 106,5$ ux. sans correction de relativité), deux anneaux très faibles dont l'un est mesurable et a un diamètre de 7,5 mm. (sur une plaque située à 80 mm.). Cet anneau est donc dû à une distance réticulaire de 2 Å ; or, les distances réticulaires 111 et 100 de l'argent sont égales à 2,03 et 2,35. On a donc décelé ainsi une très faible diffraction par les microcristaux qui forment la feuille d'argent ⁽¹⁾.

Oxydes de magnésium, de cadmium et de zinc. Preuves de la diffraction des électrons par des poudres cristallines ordinaires. — Ces expériences de diffraction ont été réalisées avec des fils ou des diaphragmes recouverts de ces oxydes suivant la méthode indiquée. Les électrons utilisés ont eu des vitesses comprises entre 9 000 et 17 000 volts, les plus beaux résultats étant obtenus avec des diaphragmes. Je n'ai pas poussé les recherches du côté des tensions plus élevées, parce que l'appareil ne le permettait pas : les expériences réussiraient certainement, mais le voile serait probablement plus élevé (à cause des rayons X émis) et il faudrait utiliser une dispersion plus grande.

Du côté des tensions plus faibles, d'autre part, les plaques deviennent peu sensibles et les anneaux, très faibles, sont noyés dans un voile général (électrons diffusés).

(1) Cette expérience n'a été réussie qu'après toutes celles qui vont être décrites et qui établissent l'existence de la diffraction des électrons par une poudre cristalline ordinaire. Elle ne suffirait évidemment pas à justifier cette interprétation.

Les anneaux sont bien dus à des électrons. — Avant de donner les résultats que l'on peut tirer des mesures il faut s'assurer de ce que les anneaux sont bien dus à des électrons et non pas à quelques rayons X parasites. En fait, ceci est déjà très improbable puisque :

1° La longueur d'onde qu'on peut calculer à partir des dimensions connues des mailles des oxydes est de l'ordre de 100 u. X. pour des électrons de 15 000 volts, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde d'un rayon γ mou, lequel nécessiterait pour sa production 120 kilovolts environ. Et, si l'on admettait que les anneaux sont dus à des rayons tels que les rayons K du fer, il faudrait que la diffraction ait été produite par des substances à très grande maille, telles qu'une substance organique, ces substances variant d'une expérience à l'autre. Et même cela serait impossible puisque :

2° Les anneaux dépendent de la tension excitatrice mise sur le tube, ce qui montre qu'ils ne sont pas dus à des rayons X caractéristiques, seuls capables de donner des anneaux.

Des expériences directes ont cependant été faites pour rendre le fait certain. Elles ont été de deux sortes : des expériences de déviation magnétique et des expériences d'absorption.

Parmi les premières, il faut citer les expériences de déviation par le champ magnétique terrestre, qui se font automatiquement et dont il sera question au chapitre suivant. J'ai réalisé en plus une expérience de déviation sur des électrons de 15 650 et 13 460 volts, diffractés par un diaphragme à oxyde de cadmium. Les anneaux sont d'abord formés suivant la méthode ordinaire, puis un pôle d'aimant est placé à une certaine distance du faisceau électronique. Lorsque la plaque est révélée, on voit *deux* systèmes d'anneaux, centrés sur les deux spots.

Enfin, des expériences ont montré que les anneaux sont

arrêtés par des feuilles très minces placées sur la plaque ce qui ne serait pas le cas s'il s'agissait de rayons X de 100 u. x. Dans une expérience, réalisée avec de l'oxyde de cadmium et des électrons de 16 670 volts, la plaque avait été recouverte partiellement d'une bande d'aluminium battu : les anneaux étaient à peine visibles sous cette bande : la feuille ayant une épaisseur de l'ordre du μ , des électrons de cette vitesse peuvent encore la traverser : d'où la faible impression obtenue encore, accrue par l'effet des trous dont la feuille est constellée. Une bande de feuille de cellophane de $3/100^e$ de mm., supprime complètement les anneaux (électrons de 15 650 volts).

Les anneaux sont donc bien dus à des électrons.

Résultats des mesures

Précision des expériences

Nous prendrons comme résultats typiques :

1) MgO	V = 16.670 volts	}	Diaphragme d'aluminium
2) »	V = 10.870 »		
3) CdO	V = 16.670 »	}	Photographie représentée
4) »	10.870 »		
5) ZnO	11.150 »	}	Fil d'argent
6) »	7.600 »		

r étant le rayon d'un anneau, corrigé comme il a été dit, dû à un cône de diffraction dont l'angle au sommet est 4θ , nous avons :

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{r}{D}$$

$$\lambda = 2 \frac{d}{n} \sin \theta,$$

d étant la distance réticulaire relative à la direction de plans qui a donné l'anneau.

D , r sont mesurés directement : λ est calculée par la loi de De Broglie ; on détermine ainsi un ensemble de distances réticulaires d . A la précision des expériences, cet ensemble doit coïncider avec celui qui appartient au cristal en expérience, déterminé par les rayons X.

D est de l'ordre de 80 mm. dans ces expériences et sa mesure se fait à $2/10^6$ de mm. environ. D'où une erreur de $1/400^e$.

La tension, dans ces expériences, était fournie par le secteur. Sa définition serait très mauvaise sans précautions spéciales, à cause des variations de tension du secteur. Les expériences ont été faites autant que possible à des heures où le secteur était calme ; d'autre part, durant la durée d'une pose, les indications du voltmètre Abraham suivent instantanément les variations de tension et un rhéostat placé en série sur le primaire du transformateur permet de ramener instantanément la tension à sa valeur correcte. Avec un peu d'habitude et en période calme, on arrive très bien à maintenir la tension constante à 100 volts près. V est donc définie et mesurée à $1/100^e$ près pour 10 000 volts.

Les diamètres des anneaux varient entre 6 et 30 mm. : la précision avec laquelle ils peuvent être mesurés est variable (suivant leur intensité). Elle a été indiquée à côté de chaque anneau.

L'oxyde de magnésium a pour réseau un réseau de cubes à faces centrées, du type de celui du chlorure de sodium (groupe de recouvrements, O_h^5 , (14) p. 226). La dernière colonne des tableaux précédents donne l'ensemble des valeurs des distances réticulaires d'un tel édifice, a désignant le côté de la maille cubique. a est déterminé dans chaque cas par la mesure de l'anneau 100 qui est très intense et peut se mesurer avec une machine à diviser à $1/100^e$ mm. ; a est ainsi déterminé à $1/100^e$ près.

Les chiffres précédents établissent que :

1° Dans chaque cas, les distances réticulaires trouvées coïncident, aux erreurs près, avec celles de l'ensemble O_h^5 . Il n'y a exception, dans le premier cas, que pour l'anneau très faible 3, qui doit être dû à quelque impureté.

Oxyde de magnésium.

Plaque 78. — $V = 16.670 \pm 150$ volts ; λ de Broglie $= 94,1$ UX à $1/200$.

Diaphragme. — Largeur de la tache centrale : $0,06$ mm. $D = 80,1$ à $1/400$.
Correction sur le rayon : $0,03$.
Pose : une heure.

Anneaux	Intensité	Diamètre mesuré	Rayon corrigé ou mesuré directement	d/n en Angströms	Précision sur d/n	$\frac{d}{n}$ [$O_h^5, a = 4,18$]
		mm.	mm.		o/o	
1	Faible	6,1 à $1/10$	3,1	2,43	2,5	(111) 2,41
2	Intense	7,149 à $1/100$	3,60	2,092	0,8	(100) 2,09
3	Très faible	8,4 à $2/10$	4,23	1,78	3	?
4	Intense	10,11 à $1/50$	5,08	1,48	1	(110) 1,48 311 manque
5	Moyen	12,4 à $1/10$	6,23	1,21	1,5	(222) 1,2
6	Très faible		7,3 $2/10$	1,03	3	(200) 1,045 331 manque
7	Intense	16,1 à $1/10$	8,08	0,94	1,3	(210) 0,93
8	Intense		8,8 $1/10$	0,86	1,5	(211) 0,85
9	Très faible		10,3 $2/10$	0,74	2	(220) 0,74
10	Faible		10,9 $1/10$	0,69	2	(221) 0,698
11	Très faible		11,4 $3/10$	0,67	3	(310) 0,66
12	Très faible		13,1 $3/10$	0,58	3	(320) 0,58
13	Faible		13,7	0,55	3	(321) 0,56

Plaque 79. — $V = 10.870$ volts ± 100 ; λ de Broglie $= 116,9$ UX à $1/200$.

Diaphragme. — Largeur tache centrale : $0,08$ mm ; $D = 80,1$.
Pose : 1 h. 30

Anneaux	Intensité	Diamètre mesuré	Rayon corrigé	d	Précision	$\frac{d}{n}$ [$O_h^5, a = 4,2$]
		mm.			o/o	
1	Très faible	7,9 à $2/10$	4	2,34	4	111 2,42
2	Intense	8,85 à $1/50$	4,46	2,1	1	100 2,1
4	Intense	12,6 à $1/20$	6,34	1,48	1,2	110 1,487 311 manque
5	Très faible	15,5 à $3/10$	7,8	1,2	3	222 1,21 331 manque
6	Faible		9,9 $2/10$	0,95	3	210 0,94
7	Faible		10,9 $2/10$	0,86	3	211 0,85

2° Aux erreurs près, α est le même dans les deux cas, $V = 16\,670$ et $V = 10\,870$ volts (différence de $1/2$ o/o) et la valeur moyenne $4,19$ A. U. coïncide à 1 o/o près avec les valeurs de α déterminées par les rayons X, lesquelles s'échelonnent entre $4,18$ et $4,22$; la valeur fournie par les tables internationales [(15), p. 342] étant $4,20$. Il résulte donc des mesures précédentes que, dans le domaine de ces vitesses, la loi de de Broglie est vérifiée à 1 o/o près, sans indice.

Un grand nombre d'autres expériences ont été faites, avec d'autres montages et d'autres vitesses. Ils confirment tous ce résultat. C'est ainsi par exemple qu'un fil d'argent recouvert de magnésie (photographie 67) bombardé par des électrons de $13\,860$ volts ($\lambda = 103,4$ u. x.) a révélé 6 anneaux, dont la mesure donne $d_{100} = 2,1$, $\alpha = 4,20$ à 1 o/o également.

Remarque sur l'influence du facteur de structure sur la diffraction des électrons. — La diffraction des rayons X par l'oxyde de magnésium présente une particularité intéressante : pour toutes les réflexions sur les plans à 3 indices impairs, les ions Mg^{++} se répartissent suivant des plans parallèles, situés à la distance d et les ions O^{--} forment des plans qui sont placés juste au milieu des premiers : Mg^{++} et O^{--} diffractent donc des rayons X qui sont en opposition de phase pour toutes les réflexions d'ordre impair. Or ces deux ions ont le même nombre d'électrons, leurs pouvoirs réflecteurs sont donc les mêmes près de l'incidence normale et, bien qu'ils ne diminuent pas suivant la même loi avec l'angle d'observation, ils restent toujours assez voisins pour que les réflexions sur les plans à trois indices impairs soient faibles : en fait, sur les photographies de poudres de MgO , 111 est très rarement visible.

On remarquera qu'il en est de même pour les électrons. Sur nos photographies, l'anneau 111 est très faible et les anneaux 311 , 333 , 511 qui seraient bien séparés de leurs voisins (Cf. CdO) n'existent pas.

La diffraction des électrons possède donc, dans ce cas au moins, les mêmes particularités d'intensité que celle des rayons X et le facteur de structure joue le même rôle.

Oxyde de cadmium.

Photographie 80 (représentée Ph. 4). — $V = 16,670$ volts ± 150 ;
 $\lambda = 94,1$ à $1/200$.

Largeur tache centrale : de $0,13$ à $0,08$.

Correction sur r : $0,05 \pm 0,015$; $D = 80,4$ à $1/400$.

Photographie 4. — Pose : 1 heure.

Anneaux	Intensité	Diamètre mesuré	Rayon corrigé	$\frac{d}{n}$	Précision sur d/n	$\frac{d}{n}$ [$O_h, a = 4,68$]
		mm.			0/0	
1	Intense	5,57 à 3/100		2,66	1,8	2,7 111
2	Intense	6,47 à 3/100		2,31	1,7	2,34 (100)
3	Intense	9,18 à 2/100		1,63	1	1,65 (110)
4	Intense	10,7 à 2/100		1,4	1,3	1,41 (311)
5	Faible	11,1 à 1/10		1,35	2	1,35 (222)
6	Intense	14,4 à 2/100		1,045	1	1,17 (200)
						1,07 (331)
						1,04 (210)
7	Intense	15,85 à 2/100		0,954	1	0,954 211
8	Faible	16,8 à 1/10		0,9	1,5	0,899 333
						511
9	Très faible	18,4 à 3/10		0,82	2	0,828 229
						0,791 531
10	Moyen	19,3 à 1/10		0,785	1,5	0,78 (221)
						(300)
11	Faible		10,3 1/10	0,739	2	0,739 (310)
12	Faible		10,7 1/10	0,712	2 à 3	0,716 (533)
13	Faible		11,7 1/10	0,652		0,655 (551)
						711
						320
14	Très faible		12,2 2/10	0,63		0,627 (321)
15	Faible		12,4 2/10	0,62		0,608 (553)
						(731)
16	Faible		13,5 2/10	0,57		0,568 (322)
						(733)
17	Très faible		14,3 2/5	0,54		0,540 (751)
18	Très faible		15 2/5	0,51		0,51 (421)

Dans cette expérience comme dans la suivante, le diaphragme n'avait pas des bords exactement parallèles, ce qui cause une incertitude de $0,05$ sur la correction à apporter ; il

en résulte que la précision maxima est obtenue non pas pour les premiers anneaux mais pour ceux dont le diamètre est plus grand et l'intensité encore suffisante pour se prêter à des mesures à la machine à diviser. Le côté de la maille a donc été déterminé avec l'anneau 7, pris pour anneau 211; il donne $a = 4,68$ et les distances réticulaires correspondantes ont été inscrites dans la dernière colonne. La photographie 81 révèle 13 anneaux, obtenus avec des électrons de 10 870 volts. Les mesures sont tout à fait analogues aux précédentes et il est inutile de donner un nouveau tableau. Les distances réticulaires trouvées conduisent à adopter un système cubique à faces centrées dont l'arête est de 4,69 Å. U. à 1 0/0 près.

Les conclusions que nous pouvons tirer de ces chiffres sont les mêmes que pour l'oxyde de magnésium : les électrons redonnent la structure cubique à faces centrées que les rayons X ont révélée; aux erreurs près (1 0/0), les dimensions de la maille qu'on peut calculer à partir de la loi de de Broglie sont les mêmes à 16 670 volts et à 10 870 volts; le côté du cube que j'ai déterminé ainsi est :

$$a = 4,68$$

$$\text{Densité } 8,27$$

Au moment où j'ai publié ces chiffres (12), les diverses valeurs déterminées au moyen des rayons X étaient comprises entre 4,70 et 4,72, celle-ci étant admise par les tables internationales. La valeur trouvée ici restait donc bien dans les limites imposées par les erreurs, soit 1 0/0. Cependant, diverses autres expériences, faites avec de l'oxyde de cadmium déposé sur un fil d'argent, ou même avec un simple « grain » d'oxyde de cadmium placé sur le bord du dernier diaphragme (potentiels de 12 920, 16 670, 15 650 volts, etc.) ont toutes donné des nombres voisins de 4,68 : la valeur de 4,72 admise jusqu'ici nous a donc semblé un peu forte (12). Peu après la publication de cette note, j'ai eu connaissance

d'un travail de S. Brentano et I. Adamson, paru en mars dans lequel ces auteurs trouvent :

$$a = 4,683 \pm 0,004.$$

Le résultat fourni par la diffraction des électrons est donc parfaitement correct.

On remarquera d'autre part que, contrairement à ce qui a été trouvé pour MgO, l'anneau 111 est très intense et que les anneaux 311 (333, 511), bien séparés de leurs voisins, sont présents, tout comme pour les rayons X, puisque dans ce cas, les ions Cd^{++} diffusent beaucoup plus que les ions O^{--} .

Oxyde de zinc. — Nous n'insisterons pas ici sur la détermination de la structure de l'oxyde de zinc, qui a fait l'objet de mesures plus précises décrites au chapitre suivant. Nous citerons seulement des expériences, qui prouvent que la méthode est appréciable également à cette poudre cristalline, telles que deux expériences faites avec un dépôt d'oxyde de zinc sur des fils d'argent, et des électrons de 1150 et 7600 volts (¹). Les distances réticulaires calculées à partir des diamètres des anneaux sont :

V = 1170 volts = 115,5 u. x.	2,5	1,91	1,58	1,46	1,39
1 heure					
V = 7600 volts = 140,4 u. x.	2,46			1,44	
1 heure					
ZnO $a = 3,25$	2,48	1,92	1,62	1,48	1,48
$c = 5,23$	(1011)	(1012)	(1120)	(1013)	(1112)

Les distances réticulaires placées sur la troisième ligne de ce tableau sont calculées à partir des données des tables internationales. Ces expériences sont peu précises, notamment la seconde, pour laquelle les anneaux sont très faibles. La différence maxima entre les valeurs données par les électrons et les autres est de 4 0/0 (1013, $V = 7600$ volts), cet

(¹) Cf. également l'analyse d'un diaphragme de laiton oxydé, p. 58.

écart ne dépasse pas les erreurs expérimentales, dues ici à la mesure du diamètre de l'anneau ($1/2$ mm. sur 16 environ).

La loi de de Broglie est donc encore vérifiée, avec moins de précision, il est vrai, dans ce dernier cas, mais les expériences décrites au chapitre suivant montrent que la vérification peut se faire à moins de 1 o/o, précisément avec l'oxyde de zinc.

CHAPITRE VI

Vérification de la loi de de Broglie à 3 0/00.

Les « tissus » d'oxyde de zinc. — Je me suis proposé de vérifier la loi de de Broglie avec le plus de précision possible, dans le domaine de vitesse dont il a toujours été question jusqu'ici (7 000-20 000 volts environ).

Le montage précédent comporte une correction, due à l'épaisseur du fil ou à la largeur du diaphragme ; elle peut être faite aisément, comme on l'a vu ; il vaut évidemment mieux la supprimer, en utilisant une surface diffractante qui utilise tout le pinceau cathodique.

Nous y sommes arrivé de la façon suivante : en amorçant la combustion d'un morceau de zinc suffisamment gros et le retirant de la flamme du Bunsen au moment où la combustion prend l'allure d'une explosion, on peut obtenir, fixées sur le zinc et son support, des membranes d'oxyde, excessivement ténues. Avec un peu d'habitude, on peut arriver à placer l'une de ces membranes sur un diaphragme de laiton qui sera fixé ensuite à l'extrémité du « canon » à électrons. Il suffit de passer le doigt propre sur le diaphragme, préalablement nettoyé et poli, et d'amener celui-ci au contact de la membrane. On en prend ainsi un morceau qui recouvre le diaphragme.

Observée à la loupe ou au microscope, cette membrane apparaît comme formée d'une multitude de petits amas d'oxyde, séparés par des trous : c'est cette apparence qui m'a fait désigner ces membranes sous le nom de « tissus »

(11, 12) ⁽¹⁾. La diffraction des électrons se fait sur les bords de cette multitude de trous et toute la surface du tissu rencontré par les électrons est utilisée, de sorte qu'il n'y a aucune correction.

Photographie 62. — $V = 17.250 \text{ volts} \pm 200 = 92,44 \text{ à } 1/200 \text{ UX}$ ⁽¹⁾.
Photographie 15.

Anneaux	Intensité	Diamètre	$\frac{d}{n}$ Angstr. Précision	$\frac{d}{n}$
		mm env.		
1	Intense	5,30 à 3/100	2,79 à 1 0/0	2,815 (1010,3)
2	Intense à peine flou séparés	5,9 1/10	2,5 3	2,61 (0002,1) 2,479 (1011,6)
3	Intense net	7,78 3/100	1,90 0,8	1,916 (1012,6)
4	Moyen	9,17 3/100	1,61 0,8	1,625 (1120,3)
5	Intense net	10,08 3/100	1,47 0,8	1,482 (1013,6) 1,407
6	Intense flou	10,8	1,37 1	1,38 (1122,6) 1,307 0004,1
7	Faible	12,6 1/10	1,17	1,185 (1014,6)
8	Intense flou	13,6	1,08	1,095 (2023,6)
9	Intense	15,22 1/20	0,973 1	0,980 (1015,6)
10	Moyen	16,4 1/10	0,986	0,88 (3032) 0,908 (2133) 0,825 (2134) 0,84 (2025) 0,83016
11	Faible	17,7 2,10	0,84	
12	Intense flou	19,3 2/10	0,76	0,776 (1121)
13	Faible	20 3/10	0,75 2	0,768 (1126)
14	Faible	24,7 3/10	0,6 2	0,606 (11,28) 0,594 (1123)
15	Faible	27,9 3/10	0,54 1,5	0,498 (112,10)
16	Moyen	30 3/10	0,5 1,5	0,462 (3031), etc.
17	Faible	32 3/10	0,47 1,5	0,44 (1125)

⁽¹⁾ Les chiffres donnés ici ne sont pas tout à fait ceux de la note (12), dans cette dernière, je n'avais pas tenu compte de la correction de relativité, la précision de ces expériences ne le nécessitant pas.

⁽¹⁾ Il est difficile de parler d'une « épaisseur » de la membrane. Il ne nous semble pas que celle-ci doive dépasser 1/100^e mm.

Les premières expériences réalisées de cette façon ont été réalisées avec une faible dispersion ($D = 80$ mm.) —, avec des électrons de 17 250 et 13 920 volts, et ont très nettement établi que la structure de ce tissu était la structure hexagonale ordinaire de l'oxyde de zinc.

L'oxyde de zinc a une structure hexagonale, très proche de celle d'un assemblage compact (cubique). Dans la dernière colonne j'ai inscrit la valeur des distances réticulaires calculées à partir des valeurs constantes internationales :

$$a = 3,25; \quad c = 5,23;$$

avec les indices des faces et le nombre de plans correspondant. Les plans qui, dans le système cubique, auraient des distances réticulaires identiques, ont ici des distances réticulaires qui sont seulement très voisines d'où un grand nombre d'anneaux qui forment souvent des groupes inséparables sur le cliché : par exemple l'anneau intense 8 très flou correspond à $2\bar{0}23$, 2130 , 2131 ; l'anneau 6 à 4 groupes de plans.

Les vérifications ne peuvent se faire que sur les plans nettement distincts des autres : $11\bar{1}0$, $11\bar{1}2$, $11\bar{2}0$, $10\bar{1}3$, $11\bar{2}2$ et on voit que les différences ne dépassent pas les erreurs expérimentales. Pour les anneaux qui correspondent à un grand nombre de plans, on voit que la valeur de la distance réticulaire calculée tombe toujours dans le groupe des distances réticulaires appartenant à ZnO et dont les valeurs sont voisines de la valeur trouvée, sans qu'il y ait d'omission.

Les mêmes résultats ont été trouvés avec des électrons de 13 920 volts, avec une précision comparable.

On peut donc dire que les mêmes phénomènes de diffraction observés sont expliqués par la structure hexagonale de l'oxyde de zinc avec :

$$a = 3,25; \quad c = 5,23;$$

et que la loi de de Broglie est vérifiée à environ 1 0/0. On voit cependant que l'accord serait meilleur si, au lieu d'admettre ces valeurs de a et c , on prenait des valeurs légèrement plus petites; les expériences précédentes ne suffiraient pas à le décider (12), mais les suivantes montrent nettement qu'il faut prendre :

$$a = 3,22; \quad c = 5,175.$$

L'accord entre les deux valeurs obtenues pour $\frac{d}{n}$ et les valeurs calculées est alors excellent.

Mesures de précision supérieure à 1 0/0. — Nous montrons par ces mesures :

1° Que le produit :

$$A = \lambda_{\text{mesuré}} \sqrt{V} \left[1 + \frac{eV}{4m_0c^2} \right]$$

est constant.

2° Que la valeur ainsi trouvée coïncide avec celle qu'on peut calculer à partir de la théorie des quanta, en prenant pour la cellule des dimensions qui concordent avec celles qu'on connaît par les rayons X, à la précision de cette dernière détermination.

Les expériences ont été réalisées avec une forte dispersion, la distance plaque-tissu étant de 233 mm. 7, et un diaphragme final de 2/10^e mm. Le transformateur était alimenté par une commutatrice fonctionnant sur accumulateurs, de façon à avoir une tension définie et mesurée à 1/150^e près. On obtient alors de très beaux anneaux, dont la photographie 6 donne un exemple, pour des électrons de 15.700 volts. La photographie présente vingt anneaux et des plans aussi voisins que 10 $\bar{1}0$, 0002, 10 $\bar{1}1$ sont nettement séparés. De même les anneaux 20 $\bar{2}3$, 21 $\bar{3}0$, 21 $\bar{3}1$, 11 $\bar{2}4$ et 20 $\bar{2}3$ sont nettement séparés, alors que leurs distances réticulaires, voisines

de 1,05 ne diffèrent les unes des autres que de $2/100^{\circ}$ d'angström environ. Ce fait doit être signalé pour montrer que les phénomènes de diffraction dus aux électrons donne des maxima d'intensité extrêmement « aigus », ce qui prouve que ce sont bien des *phénomènes à ondes multiples, faisant intervenir un grand nombre de couches cristallines* (Cf p. 61).

Les photographies deviennent moins nettes à mesure que les potentiels décroissent et le plus faible potentiel utilisé a été celui de 7980 volts. Au-dessous de ce potentiel, les anneaux sont encore décelables jusque vers 6000 volts; mais il devient impossible de mesurer leur diamètre.

La marche suivie est la suivante; sur chaque photographie, on mesure le diamètre des anneaux les mieux définis, dont les indices ont été identifiés par un calcul approché et, à partir des dimensions du réseau, on calcule la longueur d'onde correspondante. La moyenne des longueurs d'onde trouvées pour les divers plans est prise comme longueur d'onde associée au potentiel V.

Les résultats sont inscrits dans les tableaux qui suivent :

Le réseau choisi est un réseau hexagonal zincite avec

$$a = 3,22$$

$$c = 5,175 \quad (\text{Densité : } 5,77).$$

Ce réseau sera discuté par la suite. Les distances réticulaires utiles sont dès lors les suivantes :

0002	1011	1012	1120	1013
2,587	2,455	1,897	1,610	1,467

Après chaque tableau, se trouve la longueur d'onde moyenne et la valeur trouvée ainsi pour A.

$$V = 15710 :$$

Plan.	0002	1011	1012	1120	1013
Diamètre.	17,57	18,55	23,88	28,2	31,03
Anneau.	97,26	97,43	96,91	97,14	97,3

$$\lambda \text{ moyen} = 97,2 \text{ u. } x.; \quad A = 1228.$$

$V = 13480$. Tissu 1 :

$$\begin{array}{ccc} 25,74 & 30,4 & 16,67 \\ 104,5 & 104,65 & 104,65 \end{array}$$

$$\lambda_{\text{moyen}} = 104,6 \text{ u. } x.; \quad A = 1223.$$

$V = 11150$. $D = 234$ mm. 1. Tissu 2 :

$$\begin{array}{ccc} 28,4 & 36,7 & \\ 115,09 & 115 & \end{array}$$

$$\lambda = 115; \quad A = 1221.$$

$V = 10190$. Tissu 1 (photographie 7) :

$$\begin{array}{ccc} 29,8 & 38,55 & \\ 120,9 & 121 & \end{array}$$

$$\lambda = 121; \quad A = 1227.$$

$V = 9770$. Tissu 2 :

$$\begin{array}{ccc} 30,4 & 39,3 & \\ 123,2 (17) & 123,1 & \end{array}$$

$$\lambda = 123,2; \quad A = 1223.$$

$V = 9610$. Tissu 1 :

$$\begin{array}{ccc} 30,6 & 39,6 & \\ 124,2 & 124,3 & \end{array}$$

$$\lambda = 124,25; \quad A = 1224.$$

$V = 9490$. Tissu 2 :

$$\begin{array}{ccc} 30,9 & 39,9 & \\ 125,2 & 125 & \end{array}$$

$$\lambda = 125,1 \quad A = 1224.$$

$V = 9230$. Tissu 1 :

$$\begin{array}{ccc} 31,3 & 40,4 & \\ 126,8 & 126,6 & \end{array}$$

$$\lambda = 126,7; \quad A = 1223.$$

$V = 7980$. Tissu 2 :

$$\begin{array}{ccc} 33,7 & 43,6 & \\ 136,52 & 136,62 & \end{array}$$

$$\lambda = 136,6; \quad A = 1225.$$

Suivant les indications qui précèdent, les expériences ont été réalisées avec deux tissus différents; les résultats sont

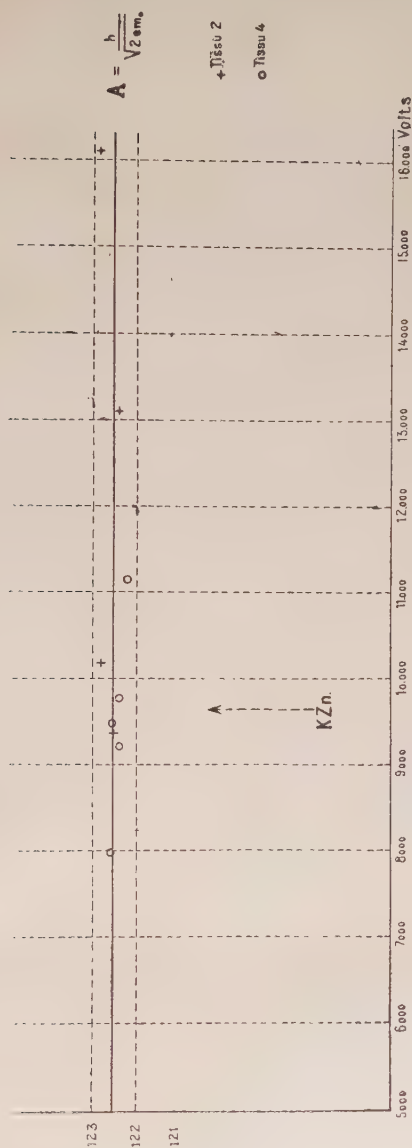


Fig. 14.

parfaitement concordants ; ce qui prouve que la structure de ces tissus est bien définie. Sur la figure 14, on a porté les valeurs expérimentales trouvées pour A.

Erreurs sur la mesure de A. Invariabilité de A. — V est définie et mesurée à $1/150^{\circ}$ près. λ est donc connu à $1/300^{\circ}$. L'erreur commise sur la mesure de D est inférieure à $1/1000^{\circ}$; la longueur d'onde est mesurée avec la précision moyenne de la mesure du diamètre des anneaux, qui va de 1 à $3/1000^{\circ}$; l'erreur commise sur A ne doit donc pas dépasser 6 à 7 0/00.

Les valeurs que nous trouvons pour A sont comprises entre 1228 et 1221, l'écart ne dépasse donc pas la limite imposée par les erreurs expérimentales ; sur la figure 15, ont été tracées autour de la droite un trait plein qui représente la valeur moyenne de A, deux droites en pointillé qui donnent les limites des erreurs expérimentales : tous les points se trouvent à l'intérieur.

Il en résulte donc que la forme de la loi de de Broglie est correcte, à 3 0/00 près.

Les mesures ont été multipliées dans la région de 9650 volts. Nous avons cherché en effet à relier les phénomènes de diffraction électronique avec les propriétés du réseau diffractant ; en particulier, les atomes de zinc du réseau de la zincite, émettent leurs rayons K lorsque les électrons qui le frappent ont une vitesse supérieure à 9650 volts. Nous avons cherché s'il n'y aurait pas quelque « accident » dans la vérification de la loi de de Broglie autour de ce point : on voit que nous n'avons rien trouvé : les phénomènes d'émission de rayonnement caractéristique par un ensemble d'atomes et de diffraction de l'onde associée par le même ensemble sont indépendants.

Choix de A. — Nous avons donc montré, à la précision indiquée, que la forme de la loi de de Broglie est correcte.

En valeur absolue, la valeur moyenne que l'on trouve pour A doit coïncider avec celle que l'on peut calculer d'après la théorie des quanta, soit $1,2244 \times 10^4$, en prenant pour point de départ le réseau de l'oxyde de zinc. Si l'on admettait le réseau que donnent les tables internationales :

$$a = 3,25; \quad c = 5,25,$$

la valeur trouvée pour A serait trop forte d'environ 1 o/o ($1,237 \cdot 10^4$), erreur qui dépasserait nettement les erreurs de ces expériences et il faut adopter, pour obtenir la valeur correcte de A le réseau qui a été donné plus haut :

$$a = 3,22; \quad C = 5,175; \quad \frac{c}{a} = 1,607.$$

Ce réseau est parfaitement admissible, car la précision des déterminations aux rayons X faites sur l'oxyde de zinc ne dépasse pas 1 o/o ; les constantes internationales ont été choisies suivant un travail de Weber mais les déterminations de Bragg, Aminoff, Hedwall donnent une moyenne de :

$$a = 3,22; \quad c = 5,18; \quad \frac{c}{a} = 1,608. \quad (15)$$

La densité calculée avec le réseau que nous avons déterminé par les électrons est de 5,77 ; là, encore, ce chiffre concorde avec les valeurs expérimentales de la densité de l'oxyde de zinc ; la valeur que l'on trouve dans le *Recueil des constantes* est en effet de 5,78.

CHAPITRE VII

L'analyse électronique.

Les résultats qui précèdent montrent clairement que :

1° Les électrons sont capables de donner des phénomènes de diffraction avec des poudres cristallines, et par conséquent, avec des structures atomiques.

2° Ces phénomènes sont régis par la loi de de Broglie et la loi de Bragg.

Ces deux postulats créent une nouvelle méthode d'analyse des structures ; notamment, des structures superficielles, sur lesquelles les physiciens ne connaissent encore que bien peu de choses. On peut appeler cette analyse : l'analyse électronique, dont nous donnerons ici quelques applications pratiques.

Les avantages de l'analyse électronique pour l'étude des structures sont les suivants :

1° Dépense d'énergie extrêmement faible. Les photographies d'analyse des oxydes vers 15 000 volts ont duré une heure environ, avec une dépense de 15 à 25 watts dans le tube. Pour obtenir une bonne photographie de poudres en une heure avec un tube à rayons X, il eut fallu prendre un tube à anticathode de molybdène, à faisceau filtré, ce qui aurait exigé environ 1 kilowatt.

Lorsqu'on examine une photographie d'analyse électronique, on ne peut manquer d'être frappé par le fait que les plus forts anneaux de diffraction ont une intensité qui est comparable à celle du spot central. Les propriétés de la plaque photographique interviennent évidemment, les plaques

présentant un faible contraste pour les électrons. Le fait n'en reste pas moins et il est certain que le rapport $\frac{\text{intensité diffusée}}{\text{intensité incidente}}$ est plus grand pour les électrons que pour les rayons X.

2° Il suffit d'une quantité infime de matière pour qu'on soit capable d'avoir sa structure : dans les expériences sur les tissus d'oxyde de zinc, la quantité de matière utile était au maximum de un millième de mm^3 .

3° L'ensemble des anneaux qui caractérisent la structure tient sur une plaque de petites dimensions, sans aucun brouillage dû à des longueurs d'onde voisines.

4° La longueur d'onde peut être choisie à volonté, ce qui permet un grand nombre d'expériences de vérification.

Les exemples d'application que nous citerons sont les suivants :

1. **Analyse d'une feuille d'or très mince.** — On peut arriver à préparer des feuilles d'or qui donnent déjà des phénomènes de diffraction avec des électrons de 10 kilovolts environ en utilisant la technique suivante :

De l'eau régale diluée est placée dans un verre, la surface de l'eau régale devant être parfaitement propre.

Une lanière d'or battu est tenue verticalement et approchée de la surface ; elle est légèrement inclinée au moment où elle va arriver en contact avec le liquide, puis descendue lentement. La feuille se couche sur la surface du liquide, et, si l'opération est bien conduite, la feuille flotte, sans que la partie supérieure soit mouillée.

La feuille se dissout lentement et les progrès de la dissolution se suivent à l'aide d'une lampe placée en L. Cette façon d'opérer offre l'avantage que, arrivée à une certaine épaisseur, la feuille ne se dissout plus qu'avec une extrême lenteur et elle ne disparaît pas complètement. Il reste des pelli-
cules grises par transmission et qui possèdent encore l'éclat de l'or.

Si l'eau régale n'était pas trop concentrée, ces pellicules peuvent se relever sur des lamelles de mica très propres; elles sont portées sur des surfaces d'eau distillée, simplement en plongeant très doucement les lames de mica dans l'eau.

Enfin, lorsque la feuille a été lavée plusieurs fois, elle est relevée sur un mica percé d'un tout petit trou ($3/10^e$ à $4/10^e$ mm.) dont les bords ont été soigneusement douxis, et le tout est mis à sécher. C'est là l'opération la plus délicate, beaucoup de feuilles se déchirant à ce moment; même avec un séchage très lent beaucoup des membranes se cassent. On obtient ainsi des feuilles grises constellées de trous. La feuille, montée sur mica, est aisément manipulable et elle peut être serrée sur un support analogue à ceux qui ont été décrits plus haut.

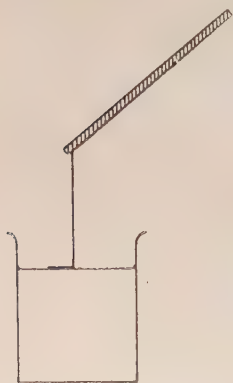


Fig. 16.

Diverses expériences, faites avec ces films et des distances plaque-film considérables, avec des potentiels de 8 à 11 kilovolts ont toutes révélé un premier anneau intense et d'autres anneaux plus grands et plus faibles. Ceux-ci sont difficilement mesurables sur des photographies à grande dispersion (D voisin de 28 cm.), mais il est tout de suite apparu qu'ils appartiennent à l'or, comme le montrent les résultats suivants :

Photographie 6 :

$$V = 9000 \text{ volts}; \quad \lambda = 128,50 \text{ u. x.} \quad D = 282 \text{ mm.}$$

3 anneaux faibles en plus de l'anneau intense de diamètres 31, 36, 50 mm. ce qui correspond à des distances réticulaires de 2,34; 2,02 et 1,45 Å. U. alors que celles de l'or pour les plans III, 100 et 110 sont de 2,34, 4,03 et 1,44 Å. U.

Ces anneaux sont dus aux électrons qui ont été diffractés par les cristaux d'or qui se trouvent sur les bords des trous de la feuille. L'anneau intense, qui a le diamètre le plus faible, ne peut pas s'interpréter comme étant un anneau dû à l'or. La distance réticulaire correspondante a en effet été trouvée de :

4,20	Photographie	6	V = 9 000 volts
4,15	»	15	V = 8 900 »
4,25	»	18	V = 9 750 »
4,15	»	19	V = 10 920 »

etc., etc.

La valeur moyenne est de 4 Å. 2, ce qui ne peut être dû à l'or. D'autre part, la différence d'intensité entre cet anneau et les autres prouve que l'anneau central est dû à une autre substance, impureté, qui a dû venir se déposer sur la feuille d'or (sur le bord des trous).

Or, la graisse des rodages, analysée aux rayons X (K_{α} du cuivre), révèle un anneau diffus, analogue à un anneau de liquide, et un anneau net, dû à une distance réticulaire de 4 Å. 24. La graisse est constituée par un mélange de paraffine, vaseline et caoutchouc. L'anneau en question est dû à la paraffine, et il nous semble certain que l'anneau décelé par les électrons n'est autre chose qu'une diffraction par une couche très mince de paraffine déposée sur les membranes. L'analyse aux rayons X des feuilles d'or prises dans le livret n'a donné aucune trace d'impureté et les membranes elles-mêmes sont trop minces pour donner un résultat avec les rayons X. On a là un exemple frappant de la sensibilité de l'analyse électronique. L'origine de cette couche de paraffine, peut s'expliquer par un dépôt dû à la sublimation de la graisse dans le vide, sans qu'on comprenne pourquoi ce dépôt ne se fait pas sur les poudres cristallines étudiées par la même méthode.

2° MISE EN ÉVIDENCE D'UNE OXYDATION SUPERFICIELLE. — Un diaphragme de laiton de 0 mm. 5 d'épaisseur environ est porté vers 600° à l'air, durant quelques instants. Il est ensuite monté dans l'appareil, de telle sorte que le faisceau électronique vienne tomber sur une petite région du diaphragme. Sur la plaque photographie 8, située à 80 mm. 6 (électrons de 11 170 volts) apparaissent des fragments d'anneaux, situés par rapport à l'image centrale du côté opposé à celui qui correspond à l'ombre de la région du diaphragme utilisée et centrée sur celle-ci. La détermination du centre des anneaux est imprécise ; les distances réticulaires calculées sont de :

$$2,73; \quad 2,46; \quad 1,89; \quad 1,6; \quad 1,46; \quad 1,37, \text{ etc.}$$

Il s'agit donc des plans $10\bar{1}0$, $10\bar{1}1$, $10\bar{1}2$, $10\bar{1}3$... de l'oxyde de zinc.

Le diaphragme n'est cependant que très légèrement blanchi ; les électrons ont immédiatement décelé l'oxydation, le zinc seul s'étant oxydé ; le cuivre ne semble pas avoir été attaqué.

Les rayons X auraient été incapables de déceler une aussi faible quantité d'oxyde.

3° ANALYSE D'UN NOIR DE FUMÉE. — Un diaphragme linéaire à bords d'argent, monté comme il a été dit, est passé très vite dans la flamme d'une lampe servant à noircir des bandes d'oscillographe.

L'analyse du dépôt par les électrons montre un noircissement intense de la plaque et, dans le voile, apparaissent quelques anneaux, avec un contraste très peu marqué (Expériences faites avec des électrons de 13 240 à 15 380 volts).

Voici les résultats de l'analyse par des électrons de 15 380 volts $\lambda = 98$ u. u.

Photographie 124. — $D = 80,1$.

Rayon . . .	2,2	3,8	4,6	6,7
Distance réticulaire . .	3,57	2,07	1,71	1,16
Graphite . .	3,41 (0002)	2,13. (0111) (0110)	1,70 (0004)	1,16 (2112)

Il résulte donc de cette analyse que le noir de fumée étudié, se composait de graphite, sous la forme de cristaux très petits (anneaux flous) et de particules qui ont donné naissance à une diffusion générale des électrons. Celles-ci peuvent être le « carbone amorphe » dont l'existence a été discutée par Clark (18) les noirs de fumée présentant aux rayons X des diagrammes très divers, depuis le diagramme du « liquide » jusqu'à celui du « graphite ». Il semble plus probable que ces particules extrêmement fines responsables de la diffusion générale observée, sont formés de quelques molécules d'hydrocarbures à très grand nombre d'atomes de carbone.

Quoi qu'il en soit, on sait que les propriétés adsorbantes d'un noir de fumée dépendent au plus chef de sa structure cristalline ; les électrons la mettent ainsi en évidence et ils permettront certainement l'étude des phénomènes d'absorption, que nous espérons pouvoir entreprendre par cette méthode.

CONCLUSION

Dans le travail précédent, nous avons donc établi :

1° Qu'un faisceau homogène d'électrons est capable de donner des phénomènes de diffraction cristalline, avec un montage analogue à celui de Debye-Scherrer.

2° Que ces phénomènes de diffraction apparaissent comme dus à un rayonnement dont la longueur d'onde est donnée par la loi de de Broglie, les maxima d'intensité diffractée étant fournis par la loi de Bragg.

3° Que la méthode d'analyse ainsi créée, ou analyse électronique, est extrêmement sensible et qu'on peut en attendre beaucoup pour l'étude des structures superficielles.

Nous avons évité à dessein toute considération théorique, il nous semble en effet que tout ce que la théorie peut donner actuellement, c'est l'équivalence formelle que nous avons posée au début de ce travail. Il faudrait pouvoir introduire dans l'équation des ondes la fonction potentielle V , caractéristique du réseau cristallin, d'où un problème mathématique très ardu dont on peut à peine tirer une théorie de l'intensité des faisceaux réfléchis, les difficultés rencontrées ensuite pour obtenir l'accord entre l'expérience et la théorie devant être les mêmes que celles auxquelles on se heurte pour les rayons X (connaissance imparfaite de l'état du cristal de la structure diffractante). Les premiers essais dans cet ordre d'idées sont encore bien imparfaits (Cf. par exemple 19).

L'expérience établit les phénomènes de diffraction dus aux électrons, mais il faut bien avouer qu'ils sont nettement incompréhensibles et incompatibles avec nos images de l'électron : non seulement on se trouve en présence des diffi-

cultés des problèmes d'interférences du point de vue quantique, mais encore le quantum doit être doué ici des propriétés électriques reconnues à l'électron, et le principe d'indétermination nous semble peu satisfaisant puisqu'il revient à la suppression du principe de causalité.

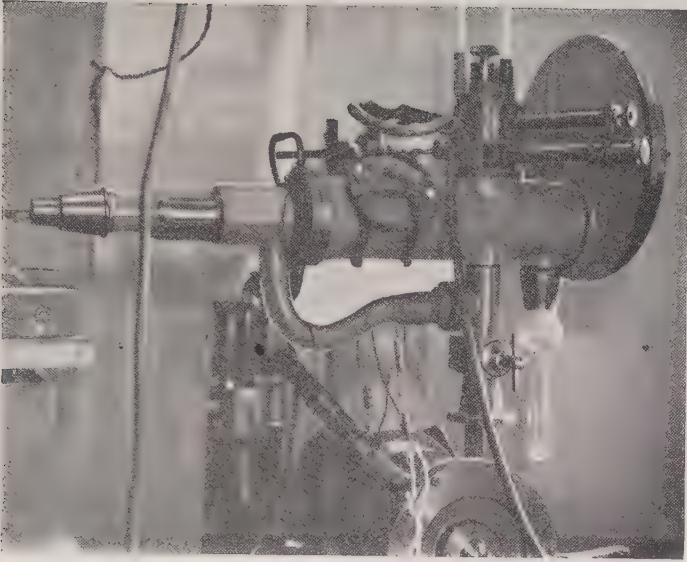
Si cependant nous tentons de nous faire une image classique, en raisonnant comme pour des interférences de rayons X, un fait important est celui-ci : les anneaux observés avec des cristaux tels que ceux des oxydes étudiés sont très nets ; leur largeur n'est pas supérieure à celle du diaphragme de sortie du faisceau électronique. Cela signifie qu'un nombre de plans cristallins interviennent dans la diffraction ; un calcul grossier, montre que, dans le cas du plan 100 de ZnO par exemple, pour des électrons de 13 000 volts environ, il faut que 50 plans environ aient envoyé des ondes diffractées dans la direction du maximum d'interférence. Le train d'ondes associées doit être très long devant le diamètre qu'on admettait pour l'électron (100 angströms au moins) et on ne voit pas quel rapport on peut établir entre ce train d'ondes et la singularité qui devrait représenter la charge électrique de l'électron. Les images classiques ne peuvent donc être conservées.

Ce travail a été fait au Laboratoire de Physique de l'Ecole normale supérieure, sous la direction de M. le professeur Abraham que je remercie pour sa bienveillante sollicitude et pour tous les moyens qu'il a bien voulu mettre à ma disposition.

Je remercie également le Comité de la Fondation de Rothschild qui m'a accordé une subvention grâce à laquelle a pu être construit l'appareil utilisé.

BIBLIOGRAPHIE

1. LOUIS DE BROGLIE. — La Mécanique ondulatoire. *Mémorial des Sciences Physiques*, t. I, Gauthier-Villars (1928).
 2. LÉON BRILLOUIN. — *La théorie des quanta*, Conférence-rapport, pp. 10 et suiv.
 3. JOHNSON. — *Physical Review*, 31 (1928), 1122.
 4. A. ELLETT et H.-F. OLSON. — *Id.*, 31 (1928), 643.
 5. DAVISSON et GERMER. — *Phys. Review*, 30 (1927), 705. Ces auteurs ont publié depuis divers mémoires, soit de recherches, soit de vulgarisation. Parmi ceux-ci, on peut signaler particulièrement : GERMER, *Optical experiments with electrons*, Bell Telephone Laboratories, n^{os} 351 et 360, octobre-novembre 1928.
 6. KIKUCHI. — *Japanese Journal of Physics*, V (1928), 83.
 7. G. P. THOMPSON. — *Proc. Roy. Soc., A.* 117 (1928), 600, 119 (1928), 651.
 8. E. RUPP. — *Annalen der Physik.*, 85 (1928), 981, 1 (1929), 773-800.
 9. E. RUPP. — *Annalen der Physik.*, 1 (1929), 801.
 10. WOOD. — *Proc. Phys. Soc.*, 35 (1923), 109-124.
 11. M. PONTE. — *Comptes Rendus*, 188 (1929), 244.
 12. M. PONTE. — *Comptes Rendus*, 188 (1929), 909.
 13. M. PONTE. — *Bulletin Soc. Franç. de Physique* (1929), 645.
 14. C. MAUGUIN. — *La structure des cristaux*, Conférence-rapport, Paris.
 15. *International critical Tables*, I (1926).
 16. I. BRENTANO et I. ADAMSON. — *Phil. Mag.*, 7 (1929), 507.
 17. C. MAUGUIN. — *La structure des cristaux*, p. 229.
 18. CLARK. — *Applied X-Rays*, McGraw Hill Book Cy, p. 177.
 19. F. ZWICKY. — On the reflection of electrons from crystal lattices. *Proc. of the Nat. Acad. Sc.*, 7 (1927), 518-525.
-



Photographie de l'appareil.

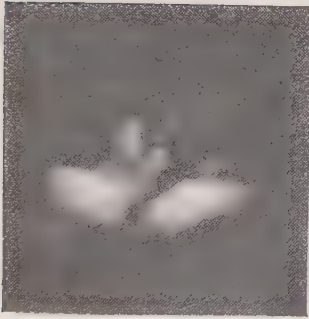


Photo 1.

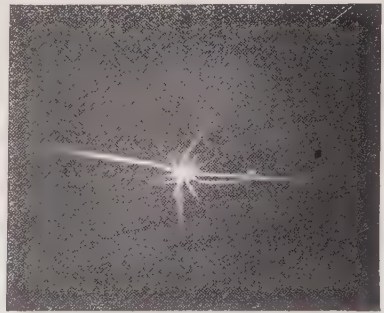


Photo 2.

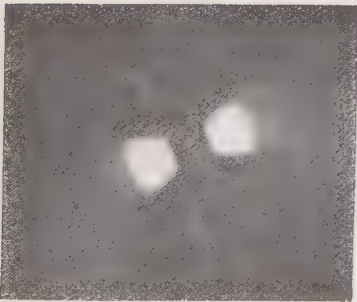


Photo 3.

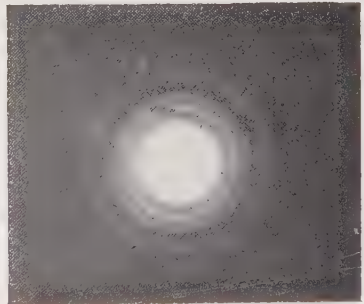


Photo 4.

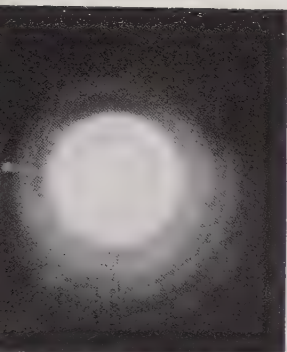


Photo 5.

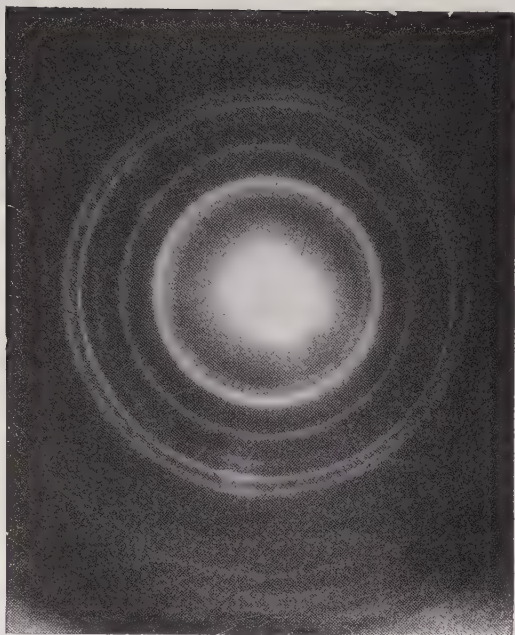


Photo 6.

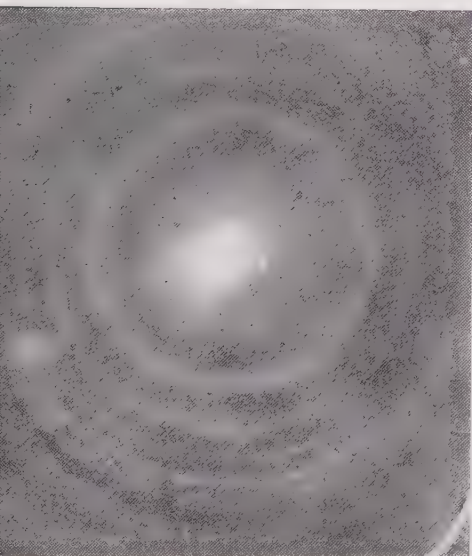


Photo 7.



Photo 8.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITION DONNÉE PAR LA FACULTÉ :

**Les formules développées
et les données physiques sur les molécules.**

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 17 février 1930,

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY.

